

**PROYECTO INTEGRADOR DE LA CARRERA  
INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECEPCIÓN  
PARA SEÑALES ADS-B.**

**Gianluca Chiesa Pastor**  
**Estudiante**

**Dr. Jorge Osmar Lugo**  
Director

**Ing. Hernán Víctor Sineiro**  
Co-director

**Miembros del Jurado**

Dr. Ing. Juan Pablo Pascual (Instituto Balseiro)

Ing. Horacio Fontanini (Instituto Balseiro)

Dr. Jorge Osmar Lugo (Instituto Balseiro - INVAP S.E)

14 de Diciembre de 2017

INVAP S.E

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina

A mi familia

A mi novia

A mis amigos

A la familia matraera

Y en especial a vos ...

# Índice de abreviaturas

ADC	Analog to Digital Converter
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
ADS-R	Automatic Dependent Surveillance Re-Broadcast
AoA	Angle of Arrival
API	Application Programming Interface
ASTERIX	All-purpose StrucTured Eurocontrol Surveillance Information eXchange
ATC	Air Traffic Controller
ATCRBS	Air Traffic Control Radar Based System
ATS	Air Traffic Services
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPPM	Binary Pulse Position Modulation
CPR	Compact Position Reporting
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSV	Comma-Separated Values
DF	Downlink Format
ESG	Extended Scenario Generator
FIS-B	Flight Information Service Broadcast
FL	Flight Level
FPGA	Field Programmable Gate Array
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
ICAO - OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
IF	Intermediate Frequency
IFF	Identifacation Friend of Foe
KLM	Keyhole Markup Language

---

LNA	Low Noise Amplifier
MLAT	Multilateración
NTP	Network Time Protocol
PSR	Primary Surveillance Radar
RASS-S	Radar Analysis Support System for Site Measurement
RES	Radar Environment Simulator
RF	Radio Frecuencia
RIUC	Radar Interface and Up-Converter
RSMA	Radar Secundario Monopulso Argentino
SAC	System Area Code
SDR	Software Defined Radio
SIC	System Identification Code
SSR	Secondary Surveillance Radar
TDoA	Time Difference of Arrival
TCP	Transmission Control Protocol
ToA	Time of Arrival
TIS-B	Traffic Information Service Broadcast
UDP	User Datagram Protocol
UIT - ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
WMLAT	Wide Area Multilateration



# Índice de contenidos

Índice de abreviaturas	v
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiii
Resumen	xv
Abstract	xvii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Radar Primario . . . . .	2
1.2. Radar Secundario . . . . .	3
1.3. Sistemas del tipo ADS . . . . .	5
1.4. Introducción a ADS-B . . . . .	6
1.4.1. Señal ADS-B . . . . .	6
1.4.2. Ventajas de ADS-B . . . . .	8
1.4.3. Desventajas de ADS-B . . . . .	9
1.5. Organización del trabajo . . . . .	9
<b>2. Desarrollo de un receptor ADS-B</b>	<b>11</b>
2.1. Receptor ADS-B . . . . .	12
2.1.1. Selección de antena . . . . .	12
2.1.2. Amplificador de bajo ruido, LNA . . . . .	15
2.1.3. Filtro pasabandas . . . . .	16
2.1.4. Radio definida por software, SDR . . . . .	16
2.2. Presupuesto . . . . .	20
2.3. Resumen Capítulo 2 . . . . .	22
<b>3. Procesamiento señal ADS-B</b>	<b>23</b>
3.1. Detección y decisión sobre señales ADS-B . . . . .	23

3.1.1.	Captura de datos . . . . .	23
3.1.2.	Interpolación de los datos . . . . .	25
3.1.3.	Módulo cuadrado de la señal . . . . .	26
3.1.4.	Detección de preámbulo . . . . .	27
3.1.5.	Decisión de bits . . . . .	30
3.1.6.	Detección de errores . . . . .	31
3.2.	Implementación de los bloques de procesamiento en FPGA . . . . .	33
3.2.1.	Diseño del procesador 3 . . . . .	33
3.3.	Resumen Capítulo 3 . . . . .	38
<b>4.</b>	<b>Decodificación de señales ADS-B</b>	<b>39</b>
4.1.	Formato de bajada (DF) . . . . .	39
4.2.	Capacidad (CA) . . . . .	40
4.3.	Dirección de aeronave ICAO . . . . .	40
4.4.	Bloque de mensaje . . . . .	40
4.4.1.	Identificación de aeronave . . . . .	41
4.4.2.	Mensaje de posicionamiento . . . . .	41
4.4.3.	Mensajes de velocidad . . . . .	49
4.4.4.	Estado de la aeronave . . . . .	52
4.4.5.	NIC/NAC . . . . .	52
4.5.	Resumen Capítulo 4 . . . . .	53
<b>5.</b>	<b>Aplicaciones destinadas al usuario</b>	<b>55</b>
5.1.	Base de datos ADS-B . . . . .	55
5.2.	Visualización de aeronaves . . . . .	56
5.3.	Sistema cliente-servidor ADS-B . . . . .	58
5.3.1.	Cliente en modo ADS-B . . . . .	59
5.3.2.	Cliente en modo comandos . . . . .	60
5.3.3.	Servidor en modo ADS-B . . . . .	60
5.3.4.	Servidor en modo comandos . . . . .	61
5.3.5.	Servidor en modo actualización de mapa . . . . .	61
5.3.6.	Futura aplicación del sistema cliente-servidor . . . . .	61
5.4.	ASTERIX . . . . .	62
5.5.	Resumen capítulo 5 . . . . .	65
<b>6.</b>	<b>Desempeño del sistema de recepción</b>	<b>67</b>
6.1.	Mediciones con el simulador de entorno de radar (RES) . . . . .	67
6.1.1.	Validación de decodificación de mensajes . . . . .	69
6.1.2.	Calidad de señal . . . . .	69

6.1.3. Capacidad de trabajo del receptor en escenarios de varias aeronaves y mensajes por unidad de tiempo . . . . .	72
6.2. Mediciones en el aeropuerto . . . . .	75
6.2.1. Área de cobertura del receptor . . . . .	76
6.2.2. Comparación de datos medidos con otras fuentes . . . . .	80
6.2.3. Medición de curva de validación de potencia. . . . .	81
6.3. Resumen Capítulo 6 . . . . .	82
<b>7. Medición del ángulo de arribo de señales ADS-B</b>	<b>85</b>
7.1. Medición de AoA con arreglo lineal de dos elementos . . . . .	86
7.2. Medición de AoA en aeropuerto . . . . .	88
7.3. Resumen capítulo 7 . . . . .	92
<b>8. Estudio de los sistemas de multilateración MLAT</b>	<b>93</b>
8.1. Estimación de la posición utilizando el algoritmo de Chan . . . . .	94
8.2. Precisión del algoritmo de Chan . . . . .	96
8.2.1. Análisis de topología para despliegue de receptores . . . . .	101
8.3. Resumen capítulo 8 . . . . .	102
<b>Conclusión</b>	<b>103</b>
Trabajos futuros . . . . .	105
<b>A. Disección de la fórmula de Chan</b>	<b>109</b>
<b>B. Fotografías</b>	<b>113</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>121</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>123</b>

# Índice de figuras

1.1. Fotografía del RSMA. . . . .	4
1.2. Sistema ADS-B . . . . .	6
1.3. figura señal ADS-B . . . . .	7
2.1. Receptor señales RF. . . . .	12
2.2. Variedad de antenas para ADS-B . . . . .	13
2.3. Antena GP-1090 . . . . .	14
2.4. Adaptación GP-1090 . . . . .	14
2.5. Imagen del LNA. . . . .	15
2.6. Ganancia LNA . . . . .	16
2.7. Filtro pasabandas ADS-B . . . . .	17
2.8. Transferencia del filtro pasabandas ADS-B . . . . .	17
2.9. SDR RTL 2832U R820T . . . . .	18
2.10. USRP B210 . . . . .	20
2.11. Diagrama de bloques USRP B210 . . . . .	21
3.1. Diagrama de flujos procesamiento ADS-B . . . . .	24
3.2. Comparación de tiempos de procesamientos. . . . .	25
3.3. Señal ADS-B capturada por la USRP B210. . . . .	27
3.4. Detección de preámbulo procesador 2. . . . .	29
3.5. Generador CRC . . . . .	32
3.6. Detector ADS-B en FPGA. . . . .	34
3.7. Filtro correlación procesador 3. . . . .	35
3.8. Maquina de estados procesador 3. . . . .	36
4.1. Ejemplo codificación CPR . . . . .	42
5.1. Cobertura Bs-As. . . . .	57
5.2. Trayectoria avión. . . . .	58
5.3. Esquema sistema cliente-servidor ADS-B. . . . .	59
5.4. Mapa servidor ADS-B. . . . .	62
5.5. Capturas de ASTERIX en <i>WireShark</i> . . . . .	64

5.6. Consola ASTERIX. . . . .	65
6.1. Esquema RES. . . . .	69
6.2. Comparación trayectorias con el RES. . . . .	70
6.3. Preámbulos ADS-B a diferentes tasas de muestreo. . . . .	71
6.4. Calidad de la señal a diferentes potencias de recepción. . . . .	71
6.5. Escenario de aviones en el RES . . . . .	73
6.6. Probabilidad de detección de mensajes en función del número de aviones	73
6.7. Tiempo de procesamiento por <i>frame</i> vs. densidad de mensajes . . . . .	74
6.8. Tiempo de procesamiento por muestra vs. tamaño de frame. . . . .	75
6.9. Componentes del receptor para cálculo de $T_e$ . . . . .	78
6.10. Alcance receptor a partir de sensibilidad. . . . .	79
6.11. Alcance receptor por línea de vista. . . . .	80
6.12. Cobertura receptor ADS-B en bariloche. . . . .	81
6.13. Trayectoria de aeronave dentro del área de cobertura. . . . .	81
6.14. Comparación con <i>FlightRadar24</i> . . . . .	82
6.15. Curva de validación de potencia del receptor. . . . .	83
7.1. Esquema AoA . . . . .	87
7.2. Sincronización en USRP B210 . . . . .	89
7.3. Diferencia de fases ADS-B . . . . .	90
7.4. Histogramas AoA . . . . .	90
7.5. Ajuste gaussiano de diferencias de fases. . . . .	91
7.6. Medición AoA Bariloche. . . . .	92
8.1. Esquema MLAT . . . . .	94
8.2. Precisión algortimo de Chan . . . . .	97
8.3. Precisión algortimo de Chan . . . . .	98
8.4. Cobertura MLAT . . . . .	99
8.5. Cobertura MLAT según altura de vuelo. . . . .	100
8.6. Cobertura MLAT . . . . .	101
8.7. Diagrama de bloques del segmento de recepción . . . . .	106
8.8. Diagrama de bloques del segmento servidor. . . . .	107
B.1. Fotografía cámara anecoica . . . . .	113
B.2. Fotografía RES . . . . .	114
B.3. Fotografía medición ADS-B . . . . .	114
B.4. Fotografía facilidad . . . . .	115
B.5. Fotografía AoA en aeropuerto . . . . .	115

# Índice de tablas

1.1. Campos ADS-B . . . . .	7
1.2. Tipo de mensajes ADS-B . . . . .	8
4.1. Mensaje de identificación . . . . .	41
4.2. Campos mensaje posición ADS-B . . . . .	44
4.3. Ejemplo mensaje de posición ADS-B . . . . .	46
4.4. Ejemplo mensaje de posición ADS-B en binario. . . . .	46
4.5. Campos mensaje posición en superficie ADS-B . . . . .	48
4.6. Velocidades aeronave en superficie . . . . .	49
4.7. Campos mensaje velocidad subtipo 1 ADS-B . . . . .	50
4.8. Campos mensaje velocidad subtipo 3 ADS-B . . . . .	51
4.9. Mensaje de emergencia ADS-B . . . . .	52
4.10. NIC ADS-B . . . . .	53
6.1. Mensajes detectados con y sin LNA. . . . .	72
7.1. AoA en aeropuerto . . . . .	91
8.1. Precisión del algoritmo de Chan para diferentes separaciones de antena. . . . .	99
8.2. Superficies de áreas de cobertura. . . . .	100
8.3. Evaluación topologías para MLAT . . . . .	102

# Resumen

Dentro del mundo de los sistemas de vigilancia aérea, hay una tecnología llamada ADS-B que está siendo revolucionaria, debido a sus bajos costos y versatilidad. Con la motivación de esta revolución y debido a las recientes normas que están haciendo que este sistema sea de uso obligatorio, en este Proyecto Integrador, se desarrolló un sistema de recepción para señales del tipo ADS-B.

El objetivo del trabajo fue realizar un prototipo funcional de un receptor ADS-B y el de generar el conocimiento necesario para poder llevar este modelo a un sistema comercial. Para ello, se realizó el diseño completo del sistema, abarcando desde la toma de señal hasta la obtención y aplicación de los mensajes. Se hizo la selección de antenas, de amplificadores y de filtros adecuados para esta aplicación. También, se utilizaron Radios Definidas por Software (SDR), que permiten seleccionar los parámetros de la cadena de recepción para optimizar el funcionamiento del radar. Una vez que la señal fue digitalizada y llevada a banda base, se procedió a definir e implementar los bloques necesarios en la cadena de procesamiento, encargada de detectar y decodificar la señal. Se hicieron diferentes implementaciones de procesadores, tanto para *software*, como para *hardware* diseñado para ser utilizado en una FPGA. Con los mensajes validados y decodificados, se muestran implementaciones de aplicaciones para ser utilizadas por usuarios y operadores aéreos. En estas aplicaciones se le da importancia a la generación de bases de datos, a la visualización de las aeronaves en tiempo real y a la comunicación de la información, a través de protocolos como ASTERIX, a los controladores aéreos.

El sistema fue probado tanto en el laboratorio como en el aeropuerto. En el laboratorio, se hicieron mediciones de desempeño del receptor utilizando un Simulador de Entorno de Radar (RES), que permite crear escenarios aéreos que serían difíciles de encontrar en entornos reales. Además, en las pruebas en el aeropuerto, se midió el área de cobertura del receptor, la cual se comprobó que está limitada por línea de vista (*LoS*). Asimismo, las mediciones fueron de utilidad para validar los algoritmos desarrollados.

Debido a la dependencia del sistema ADS-B con las constelaciones satelitales GNSS y a la falta de autenticidad de los mensajes, se creyó necesario estudiar e implementar sistemas que trabajen junto al receptor ADS-B que sirvan de validadores de mensajes y de *backup* del sistema. Es por eso que se hizo un protipo de un sistema capaz de

encontrar el Ángulo de Arribo de la señal (AoA), éste fue hecho con un arreglo lineal de dos antenas y utilizando métodos de diferencia de fases. También, se construyeron curvas de validación de potencia, las cuales guardan información de la potencia media que fue emitida por un avión a una distancia  $R$ . Con esas curvas, es posible validar los mensajes de posición enviados mediante ADS-B. El último sistema analizado fue el de multilateración (MLAT), para el cual se estudiaron los diferentes factores que intervienen en su implementación. Estos sistemas permiten obtener la posición del avión emisor a partir de la diferencia de tiempos (TDoAs) entre diferentes receptores. Se hizo un estudio del algoritmo de Chan, de la precisión en función de factores como la sincronización de los relojes y la distancia, de las topologías de despliegue de las antenas y de la cobertura.

**Palabras clave:** ADS-B, PROCESAMIENTO DE SEÑALES, SDR, MLAT, AOA, ASTERIX, MODO S, RADAR, RES



# Abstract

Within the scope of aerial surveillance systems, there is a revolutionary technology, ADS-B, for its low costs and versatility. Taking this into account, as well as recent regulations that make this system mandatory, a reception system for ADS-B signals was developed in this dissertation.

The aim of this work was to make a functional prototype of an ADS-B receiver and to generate the necessary knowledge to take this model into a commercial system. For this, the complete design of the system was carried out, covering everything from signal capturing to obtaining and applying the messages. Suitable antennas, amplifiers and filters for this application were selected. Also, Software-Defined Radios (SDR) were used, which allow to select the parameters of the reception chain to optimize the operation of the radar. Once the signal was digitized and being in its baseband representation, the definition and the implementation of necessary blocks in the processing chain was developed, in order to detect and decode the signal. Different implementations of processors were made, both for software and for hardware designed to be used in an FPGA. With validated and decoded messages, implementations of applications are shown to be used by users and air operators. In these applications, importance is given to the generation of databases, to the visualization of aircraft in real time and to the communication of information through protocols such as ASTERIX, to air traffic controllers.

Owing to the dependence of the ADS-B system with GNSS satellite constellations and the lack of authenticity of the messages, it was considered necessary to study and implement systems that work together with the ADS-B receiver that serve as validators of messages and backup of the system. For this, a prototype of an Angle of Arrival (AoA) system was made with a linear array of two antennas and using phase difference methods. Also, power validation curves were constructed, which store information of the average power that was emitted by an airplane at a distance  $R$ . With these curves, it is possible to validate the position messages sent through ADS-B. The last system analyzed was Multilateration (MLAT), for which the different factors that intervene in its implementation were studied. These systems allows the position of the emitting aircraft to be obtained from the Time Difference of Arrivals (TDoA) among different receivers. A study about Chan's algorithm, about precision based on factors such as

clock synchronization and distance, on antennas deployment topologies and coverage area was made.

**Keywords:** ADS-B, SIGNAL PROCESSING, SDR, MLAT, AOA, ASTERIX, MODE S, RADAR, RES

# Capítulo 1

## Introducción

*“Lo mejor es enemigo de lo bueno.”*

— François Marie Arouet

Dentro de la aviación, existen diferentes tecnologías para detectar aeronaves que se encuentren dentro de un determinado rango. Estos sistemas brindan información de suma utilidad a los controladores de tráfico aéreo, (*Air Traffic Controller*, ATC), para que estos puedan actuar en consecuencia de la información otorgada. La vigilancia aérea tiene un rol muy importante en la aviación civil, tanto en lo que concierne a la aviación comercial como a la aviación general, por ejemplo, brinda soporte a los pilotos de aviones que transportan cientos de pasajeros y también es de utilidad en las fronteras para detectar aeronaves ilegales.

En los últimos diez años, se ha estado desarrollando e implementando una nuevo sistema dedicado a la vigilancia aérea llamado ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*), éste intenta mejorar la seguridad y bajar los costos. Los aviones con esta tecnología envían datos de identificación, de posición, de velocidad en tres dimensiones y de estado de la aeronave en sus diferentes mensajes. Los costos disminuyen, ya que el sistema esta distribuido entre las aeronaves y las estaciones terrenales, donde los *transponders* de los aviones se encargan de emitir la información y las estaciones en tierra sólo de recibirla. El desarrollo de los receptores resulta mucho más baratos que otros sistemas de vigilancia como radares primarios o secundarios debido a su menor complejidad.

Para el año 2018, según una resolución de la Administración Nacional de Aviación Civi (ANAC), será obligatorio que todas las aeronaves de categoría especial que operen dentro de la Zona de Identificación Aérea (*Air Defence Identification Zone*, ADIZ) dispongan de *transponders* ATC o bien ADS-B. Mientras tanto, en los Estados Unidos ADS-B se convertirá en un estándar de vigilancia para el 2020, obligando a todas las aeronaves que sobrevuelen los 4000m a tener *transponders* ADS-B. Empresas reconocidas como *Garmin*, *Thales* y *Comsoft* están invirtiendo mucho en esta tecnología, tanto

en el desarrollo de los *transponders* como en el de los receptores. Los productos que ofrecen son robustos, ya que no solo contemplan la captura de mensajes (en el caso del receptor), sino que vienen acompañados de certificaciones, monitores de calidad de señal, validación de potencia, detección de dirección de arribo de la señal, sistemas de multilateración (MLAT) y otros sistemas anexados que mejoran el nivel de seguridad del vehículo aéreo. El estándar para intercambio de información de servicios de tráfico aéreo ASTERIX contempla dentro de una de sus categorías (CAT 021) a ADS-B, siendo el medio de comunicación entre los receptores y las ATC. Además, ADS-B es la principal tecnología utilizada en los sitios web *FlightRadar24*, *PlaneFinder* y *FlightAware*. Consisten en una red global de receptores de bajo costo comunicadas con un servidor central, generando una cobertura del tráfico aéreo mundial.

Con la motivación que genera la aparición de ADS-B dentro las tecnologías de vigilancia aérea debido a su bajo costo y versatilidad, el objetivo de este Proyecto Integrador será desarrollar un prototipo de un receptor capaz de capturar, detectar y procesar señales ADS-B. Para este objetivo, se tendrá en cuenta cada eslabón de la cadena, donde se hará un estudio exhaustivo de cada uno, de tal manera que, en el momento en que se quiera realizar un producto, éste pueda ser de alta calidad y cumpla con los requerimientos del mercado. También, siguiendo las buenas prácticas que se hacen dentro del estado del arte de ADS-B, se estudiarán, desarrollarán y aplicarán diferentes sistemas que hagan más robustos al receptor, como multilateración, dirección de arribo de la señal, validadores de potencia, sistemas cliente-servidor de datos, aplicación del estándar ASTERIX, etc.

En las siguientes secciones de este capítulo, se hará una descripción general de los principales sistemas de radar y, en particular del sistema de vigilancia automática ADS-B, el cual es de interés para este trabajo.

## 1.1. Radar Primario

El Radar primario es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos móviles como aeronaves, barcos, automóviles, formaciones meteorológicas y el propio terreno. Su funcionamiento se basa en emitir un pulso de radio, que se refleja en el objetivo y su entorno, y se recibe típicamente en la misma posición del emisor, radar monoestático. A partir de este ‘eco’, se puede extraer gran cantidad de información.

A fines del siglo XIX y principios del XX se empezaron a formular diferentes teorías que sentaron las bases para lo que hoy conocemos como sistema de radar. Desarrollos como el de Heinrich Hertz, que demostraba que las ondas electromagnéticas se reflejaban en superficies metálicas, o los de Nikola Tesla, quien estudio el comportamiento de las reflexiones de señales electromagnéticas en diferentes objetivos, variando la longi-

tud de onda y la potencia de la señal emitida. De estos estudios y tantos otros, nace la famosa ‘Ecuación Radar’ [1], que relaciona potencia emitida  $P_t$  con potencia recibida  $P_r$  como

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad (1.1)$$

donde  $G_t$  es la ganancia de transmisión,  $R_t$  y  $R_r$  son las distancias del transmisor al objetivo y del objetivo al receptor respectivamente, en el caso de un radar monoestático estas distancias son iguales,  $A_r$  es la apertura efectiva de la antena de recepción, mientras que  $\sigma$  y  $F$  son la sección transversal del radar y el factor de propagación del patrón respectivamente.

El primer uso que se le dio a esta tecnología fue con fines bélicos, en la Segunda Guerra Mundial. Alemania, el Reino Unido y los Estados Unidos desarrollaron sus propios radares junto a grupos de ingenieros y científicos en la antesala a la guerra, para que luego fuera uno de los factores clave a la hora de definir varias batallas [2].

## 1.2. Radar Secundario

La necesidad de identificar aeronaves fácilmente y de manera confiable llevó a otro desarrollo de radar en tiempos de guerra, la identificación de aeronaves amigas, (*Identification Friend or Foe*, IFF), que se había creado como un medio para identificar positivamente aviones amigos de enemigos. Este sistema, se conoce en el uso civil como radar de vigilancia secundario, (*Secondary Surveillance Radar*, SSR), y en los EE.UU. como sistema de radar de control de tráfico aéreo, (*Air Traffic Control Radar Based System*, ATCRBS).

El sistema de radar secundario es una combinación entre un sistema de comunicaciones y un sistema de radar propiamente dicho. Se encuentra en superficie, emite una interrogación codificada ya sea en amplitud o en fase, dependiendo del modo de interrogación. Ésta es recibida por equipos a bordo de las aeronaves llamados *transponder*. El *transponder* recibe la interrogación, la decodifica y en consecuencia emite una respuesta al radar interrogante. Con esa información, puede calcular el tiempo que tarda en regresar al radar y así estimar el rango. Como la antena gira y tiene un lóbulo de radiación direccional tiene la capacidad de obtener el acimut del avión respecto al radar [3]. De esta manera la ATC obtiene un panorama de los vehículos aéreos que se encuentran dentro de su cobertura y luego hacer un seguimiento diferenciado por aeronave para calcular su posición, velocidad, elevación, entre otros parámetros relevantes.

Existen diferentes tipos de interrogaciones, las del sistema SSR se emiten anónimamente para que respondan todos los *transponders* dentro de la zona de cobertura. Las respuestas de los transponders convencionales no contienen mucha información,



**Figura 1.1:** fotografía del Radar Secundario Monoimpulso Argentino (RSMA), desarrollado por la empresa INVAP S.E.

pueden informar más o menos parámetros, como identificación del avión (Código A) o altitud (Código C). La excepción está hecha por el Modo S, que tiene capacidad de comunicarse selectivamente con una aeronave en concreto y de establecer un canal de datos. Algunos de los modos existentes en el SSR son:

1. Modo 3 o Modo A: Interroga a las aeronaves con un código unívoco de vuelo que es fijado por el controlador.
2. Modo 4: Interroga mediante un criptocomputador de modo que solo las aeronaves que conozcan el criptosistema pueden responder. Es la base del sistema militar IFF, ya que sólo las aeronaves amigas son capaces de responder.
3. Modo S: Permite establecer un enlace de datos de forma selectiva con cada aeronave.
4. Modo 5: Equivalente militar del Modo S.
5. Modo C: Interroga la altura barométrica del avión.

El problema principal de los radares secundarios tradicionales sin capacidad de Modo S es que no pueden seleccionar la aeronave interrogada, así pues, cada interrogación realizada recibe las respuestas de todos los *transponders* dentro del alcance de la antena y del ángulo de emisión. En los escenarios actuales, donde la densidad del tráfico aéreo es mucho mayor que en el momento de la implantación original del radar secundario, es habitual que las respuestas se solapen entre sí y no puedan ser recuperadas, fenómeno conocido como *garbling*, degradando la calidad de la vigilancia aérea. La implantación del Modo S permite que el radar interroge aeronave a aeronave de modo que el radar puede manejar un escenario de tráfico mucho mayor.

Las respuestas de los transponders en Modo C tienen una resolución de cien pies de altura, mientras que el dato de altura en la respuesta de Modo S tiene una resolución de 25 pies. Así pues, la implantación del Modo S permite aerovías más próximas en altitud y por tanto optimizar el uso del espacio aéreo [3].

### 1.3. Sistemas del tipo ADS

Los sistemas de vigilancia dependiente automática (ADS), son sistemas en donde la información de posición, velocidad, estado de cada aeronave, o bien de su entorno, se encuentran dentro de una señal codificada según el protocolo correspondiente. Estos sistemas son colaborativos, ya que utilizan la información brindada por un sistema externo al propio. Ejemplos de este tipo de sistemas son ADS-B, ADS-R, FIS-B, TIS-B, entre otros.

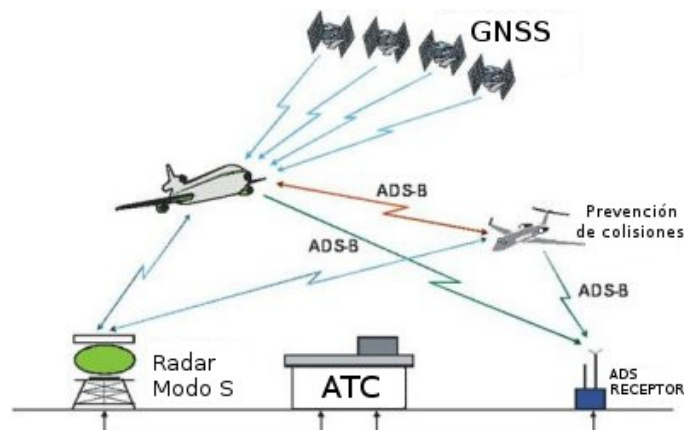
1. Sistema de Difusión de Vigilancia Automática Dependiente (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*, ADS-B), cada aeronave difunde en todas direcciones información de posición, que se obtiene a partir de la señal de GPS, velocidad, número de vuelo, estado del avión, entre otro tipo de datos. La forma de onda de la señal es la misma que la de las respuestas del Modo S de los sistemas SSR, por lo tanto, se puede hacer una distinción de cada aeronave.
2. Sistema de re-difusión de Vigilancia Automática Dependiente (*Automatic Dependent Surveillance Re-Broadcast*, ADS-R), retransmite desde las estaciones bases la información de los transponders ADS-B, hacia otros equipos con esa misma capacidad.
3. Servicio de Difusión de Información de Tráfico aéreo (*Traffic Information Service Broadcast*, TIS-B) es un sistema en donde la información brindada por los diferentes sistemas de vigilancia aérea es difundida desde la estación base hacia aeronaves que no tengan la capacidad de recibir esta información. De esta forma cada aeronave puede tener un panorama de los diferentes aviones que hay en su zona para evitar posibles colisiones. Un ejemplo de esto se da en los Estados Unidos, donde existen dos tipos de sistemas ADS-B uno en la frecuencia de 1090MHz y otro en 978MHz. Como las aeronaves pueden comunicarse entre sí, el sistema TIS-B que en este caso solo es soportado por transponders en la frecuencia de 978MHz, le informa la ubicación de los aviones con portadora en 1090MHz.
4. Servicio de Difusión de Información de Vuelo (*Flight Information Service Broadcast*, FIS-B) sistema de información de vuelo, informa a los operadores aéreos información del clima o bien de restricciones en las rutas.

5. Sistemas de multilateración (*Multilateration System*, MLAT), son sistemas colaborativos ya que necesitan la señal emitida por algún sistema de vigilancia. Si ese mensaje llega a más de cuatro antenas con ubicación conocida, entonces, se puede estimar la posición de la aeronave emisora.

## 1.4. Introducción a ADS-B

ADS-B, es un sistema de vigilancia aérea que transmite información en forma cooperativa. Es automático ya que emite los mensajes sin intervención humana y es dependiente porque utiliza información brindada por sistemas de geolocalización.

El sistema funciona gracias a la cooperación de los *transponders* de las aeronaves con las estaciones de control en tierra. A diferencia de otros sistemas de radar, en los sistemas ADS-B no hay necesidad de realizar interrogaciones desde las estaciones terrenales. ADS-B informa periódicamente datos de posición obtenidos por sistemas satelitales de posicionamiento global (*Global Navigation Satellite System*, GNSS), velocidad en 3 dimensiones, altitud, número de vuelo, estado de la aeronave, entre otros. Esta información emitida en forma de *broadcast* es recibida por receptores en superficie o por aeronaves dentro del área de vuelo de la aeronave emisora, *air-to-air communication*. En la figura 1.2, se ve un esquema gráfico del funcionamiento de ADS-B.



**Figura 1.2:** Esquema gráfico del funcionamiento del sistema ADS-B.

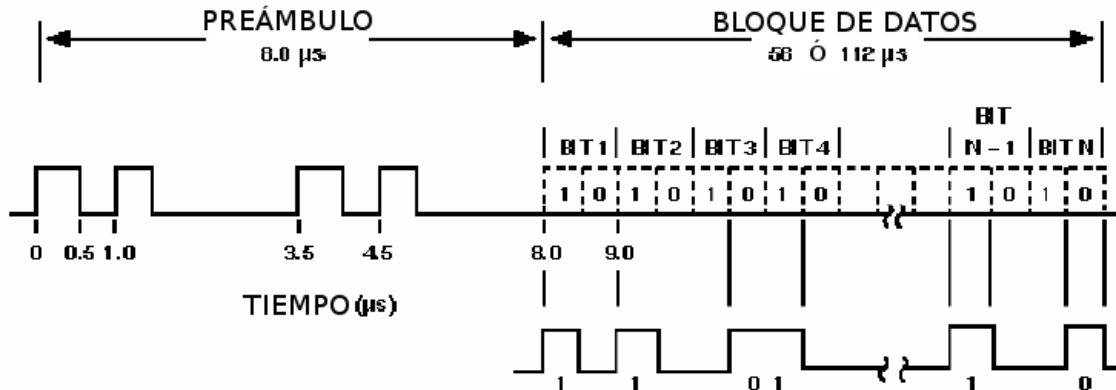
ADS-B trabaja con otros sistemas, como por ejemplo TIS-B, en donde las aeronaves que no son capaces de la comunicación *air to air* pueden informarse del tráfico aéreo de su zona, y de esa manera evitar colisiones.

### 1.4.1. Señal ADS-B

La señal emitida por el *transponder* de ADS-B está contemplada dentro del protocolo del Modo S [4] [5]. La señal viaja sobre una portadora de 1090MHz. El mensaje está compuesto por un preámbulo codificado en amplitud con una duración de 8  $\mu s$  y el



bloque de datos de duración 56 ó 112  $\mu\text{s}$ , con Modulación por Posición de Pulso Binario (*Binary Pulse Position Modulation*, BPPM), donde se utiliza codificación Manchester. Un bit está compuesto por dos *chips*, siendo un '1' cuando el *chip1* está en alto y el *chip2* en bajo, y un '0' cuando el *chip1* está en bajo y el *chip2* en alto [4] [5]. En la figura 1.3, se muestra un esquema de la señal que utiliza ADS-B.



**Figura 1.3:** Esquema de la conformación de una señal Modo S, *Mode S Reply* de 56  $\mu\text{s}$  de duración o *Mode S Extended Squitter* de 112  $\mu\text{s}$  de duración (utilizado para mensajes del tipo ADS-B).

Dentro del bloque de datos, se puede distinguir con los 5 primeros bits qué tipo de dato Modo S se está recibiendo. En este caso importan solo dos formatos de bajada (*Downlink Format DF*),  $DF=11$  (*Mode S reply*) ó  $DF=17$  (*Mode S extended squitter*). A continuación del DF, viene un código de tres bits referenciando a la capacidad (CA) de la aeronave. Luego, el mensaje sigue con una identificación única de cada *transponder* de 24 bits, llamado dirección de aeronave ICAO (*ICAO Aircraft Address*). Si el DF es 17, el mensaje contendrá además un bloque de información de 56 bits donde se encuentra la posición, la velocidad, el estado de la aeronave, o el número de vuelo, etc. Por último, al final del mensaje hay un bloque de 24 bits para chequeo de paridad. En la tabla 1.1, se puede ver los campos que comprende un bloque de datos de un mensaje ADS-B.

# Bits	Bits	Abreviación	Nombre
5	1-5	DF	Formato de bajada
3	6-8	CA	Capacidad de la aeronave
24	9-32	ICAO	Dirección de aeronave ICAO
56	33-88	DATA	Bloque de datos
	[33-37]	[TC]	Código de tipo de mensaje
24	89-112	PI	Código de chequeo de paridad CRC

**Tabla 1.1:** Campos que comprenden una señal ADS-B genérica.

Dentro de cada *frame* de datos, se pueden distinguir los diferentes tipos de códigos establecidos en la tabla 1.2.

TC	Contenido
1-4	Identificación aeronave
5-8	Posición en superficie
9-18	Posición en el aire (con altitud barométrica)
19	Velocidad en el aire
20-22	Posición en el aire (con altitud GNSS)
28	Estado de la aeronave

**Tabla 1.2:** Tipos de mensajes posibles dentro del sistema ADS-B.

En el capítulo 5, el cual habla de la decodificación de mensajes ADS-B, se explicará detalladamente cada uno de los diferentes tipos mensajes que pueden ser recibidos.

### 1.4.2. Ventajas de ADS-B

1. **Información específica:** cada aeronave emite su posición, velocidad, estado y número de vuelo de forma periódica, cosa que no hace ningún otro sistema de vigilancia aérea. Además como cada mensaje viene identificado por un código único de aeronave, permite descongestionar el canal, ya que se pueden discriminar de manera fácil cada señal recibida.
2. **ADS-B en pista:** dentro del protocolo de mensajes ADS-B se contemplan mensajes de posición y velocidad en superficie. Para ser usado en las pistas de los aeropuertos, no solo por aviones sino por todo vehículos que lleve un transponder ADS-B. Esto permite a las ATC tener un panorama más amplio de los aviones que debe controlar. No hay otros sistemas que contemplen el control de aviones en superficie y en aire. Por ejemplo para hacer un seguimiento en pista las ATC utilizan comunicación por voz en VHF, lo cual es eficaz cuando el tráfico de aeronaves es bajo, pero, cuando este tráfico sube, se necesitan sistemas como el que contempla ADS-B.
3. **Reducción de costos:** cuando se habla de costos en comunicaciones, dos factores importantes son la potencia transmitida y la sensibilidad. ADS-B reduce la emisión de potencia a la mitad ya que solo necesita emitir señales desde el *transponder*. Luego los receptores no necesitan de una gran sensibilidad ya que la distancia máxima alcanzable está limitada por la línea de vista de la antena receptora con el avión. Esto hace que se puedan fabricar receptores bastante baratos.
4. **ADS-B satelital:** junto con la cooperación de la constelación de 72 satélites de órbita baja Iridium, la información que reportan las aeronaves es tomada por estos satélites y enviada a la estación terrena de la constelación. La estación

terrena “rutea” los mensajes a la estación de control aéreo correspondiente. Esto permite básicamente extender la cobertura de un radio de 400km a una cobertura global, facilitando, por ejemplo, el seguimiento de aviones que vuelen sobre algún océano.

### 1.4.3. Desventajas de ADS-B

1. **Información pública:** los mensajes emitidos no están encriptados, por lo que conociendo bien el protocolo de codificación y decodificación de señales, es fácil generar tráfico falso. Es por eso que un sistema de mercado de ADS-B necesita un respaldo que monitoree y convalide, por ejemplo los sistemas de detección de arribo de la señal, potencia de la señal, multilateración, etc.
2. **Dependencia de GNSS:** depender de los sistemas de geolocalización también puede ser una desventaja, pese a que sea la característica principal de ADS-B. Si los sistemas de geolocalización caen, inmediatamente también cae la localización en ADS-B. Esta dependencia exige nuevamente un sistema de respaldo como multilateración.
3. **Garbling:** cuando el receptor se encuentra dentro de un escenario de muchas aeronaves emitiendo señales ADS-B, existe la posibilidad que mensajes de diferentes aviones se superpongan. A este fenómeno se lo conoce como *garbling*, éste provoca la pérdida del mensaje, a no ser que se haga un procesamiento especial cuando esto suceda.

## 1.5. Organización del trabajo

Los capítulos 2 y 3 se centran en el diseño y elección de las plataformas para el desarrollo del receptor y, además cómo procesar la señal, se hará foco en

1. *Front-End* de RF
  - a) Elección de antenas sintonizadas en la frecuencia de ADS-B, con bajo coeficiente de reflexión y buena ganancia.
  - b) Elección de cables con poca atenuación por unidad de longitud.
  - c) Utilización LNA con baja figura de ruido y una ganancia adecuada.
  - d) Filtros con bajas pérdidas por inserción y ancho de banda adecuado, etc.
2. Plataforma de desarrollo: elección de una plataforma para poder manipular la señal capturada. Para eso, se analizarán las radios definidas por software, SDR, las ofertas del mercado y las ventajas y desventajas de radios estáticas y dedicadas.

### 3. Procesamiento de señal

- a) Desarrollo de bloques de procesamiento para detección y validación de señal.
- b) Estudio de implementación de procesamiento en software o en hardware, ventajas y desventajas.

En el capítulo 4, se explicará como decodificar un mensaje ADS-B. Para eso, se utilizarán las especificaciones de la ICAO [6].

En el capítulo 5, se mostrarán diferentes aplicaciones destinadas al usuario. Las mismas, se pueden implementar a partir de los mensajes ADS-B.

1. Realización de base de datos actualizables por código ICAO.
2. Exposición en mapa en tiempo real de aeronaves dentro de la zona de cobertura.
3. Armado de trayectoria de aeronaves capturadas por el receptor.
4. Sistema cliente-servidor de mensajes ADS-B.
5. Implementación del estándar ASTERIX para intercambio de datos con las ATC.

El capítulo 6 evalúa el desempeño del receptor que se implementó. Se probó al receptor utilizando un simulador de señales ADS-B llamado Radar Environment Simulator (RES), que permite probar diferentes escenarios para comprobar el desempeño del receptor, y haciendo pruebas en el aeropuerto de Bariloche. Se verá el alcance en rango, desempeño del receptor según número de mensajes por unidad de tiempo y por cantidad de aviones, calidad de la señal frente al ruido, validación de mensajes recibidos, validación de potencia, desempeño frente a diferentes frecuencias de muestreo, etc.

En el capítulo 7, se hablará de como estimar el ángulo de arribo de las aeronaves dentro de la zona de cobertura. Mediante dos antenas adecuadas para recibir señales ADS-B separadas por una distancia menor a la mitad de la longitud de onda, se medirá la diferencia de fases entre ellas para luego calcular la dirección de arribo.

Aprovechando que los mensajes son enviados omnidireccionalmente, mediante cuatro o más antenas y midiendo la diferencia de tiempos en las cuál llega un mismo mensaje a cada receptor, se puede triangular la posición de la aeronave emisora. En el capítulo 8, se hará un análisis de implementación, donde se analizarán los parámetros más importantes de los sistemas MLAT.

Finalmente, se hace una conclusión del trabajo y de cómo éste debe seguir para lograr desarrollar un sistema de vigilancia aérea seguro, económico y que cumpla los requisitos que el mercado pide hoy.

## Capítulo 2

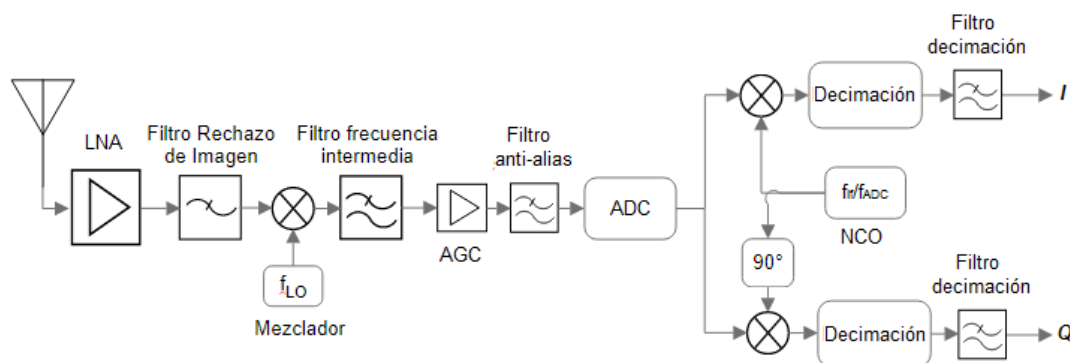
# Desarrollo de un receptor ADS-B

*“El diseño no es solo lo que se ve o lo que se siente. Diseño es cómo funciona.”*

— Steve Jobs.

Para hacer un receptor de señales de radio, se deben tener en cuenta un número importante de cosas. Las señales de radio se propagan a través del espacio dentro del espectro radioeléctrico. Las antenas son los dispositivos encargados de hacer la transición entre los medios alámbricos e inalámbricos; la forma de la antena dependerá del tipo de señal que se quiera transmitir o recibir. Una vez seleccionada la antena adecuada para el tipo de señal a capturar, es necesario acondicionar la señal capturada al tipo de procesamiento que se hará. Este tipo de acondicionamiento puede ser la amplificación de la señal, el filtrado, el movimiento de la señal en frecuencia, entre otros. Dependiendo de la aplicación y de dónde provenga la señal, se procesará la señal analógica o digitalmente. Una señal de FM puede ser procesada puramente de forma analógica, mientras que una señal con alguna modulación digital precisará alguna parte de discretización para comprender el mensaje. Como las señales que viajan en el espacio son puramente analógicas, cuando se quiere hacer un procesamiento digital de la señal se debe usar un Conversor Analógico Digital (*Analog-to-Digital Converter*, ADC). Este dispositivo discretiza la señal dentro de un rango dinámico, los factores importantes a la hora de elegir un ADC son el nivel de discretización en bits, el rango dinámico de nivel de señal aceptada, la frecuencia de muestreo y el ancho de banda analógico. En la figura 2.1, se muestra un esquema bastante genérico de un receptor que lleva la señal a banda base y hace la transformación de analógica a digital para el posterior procesamiento de la señal.

La figura muestra cómo la señal es capturada por la antena. Luego, es inmediatamente amplificada por un amplificador de bajo ruido (*Low Noise Amplifier*, LNA), el cual cumple dos funciones principales: amplificar la señal y bajar la figura de ruido del sistema de recepción. Luego, se lleva la señal de radiofrecuencia (RF) a una frecuencia



**Figura 2.1:** Diagrama de bloques de un receptor de señales de RF genérico.

intermedia (*Intermediate Frequency*, IF), esto se hace dependiendo de la aplicación y la calidad de los dispositivos utilizados. Para la bajada a IF, se utiliza un filtro que rechaza la imagen y un mezclador que lleva la señal a esa IF. Después, en este caso, se hace un filtrado pasa bajos para eliminar la señal modulada en la frecuencia suma de la portadora y el oscilador del mezclador. Más adelante, se vuelve a amplificar la señal para acondicionarla a la entrada del ADC y estar dentro del rango dinámico de éste. Antes de convertir la señal de analógica a digital, es necesario utilizar un filtro *antialiasing* que tiene como función limitar la señal en frecuencia de acuerdo a la frecuencia de muestreo, para que no se produzca un plegamiento del espectro sobre la señal de interés. Una vez dentro del mundo digital, se lleva la señal a banda base en fase y cuadratura, donde será procesada. Para lograr la frecuencia de muestreo deseada, se pasa la señal por un decimador y un filtro pasabajos que elimina las replicas producidas por el submuestreo. Una vez realizados estos pasos, la señal está lista para ser procesada según la aplicación que se precise desarrollar.

## 2.1. Receptor ADS-B

Ahora que se ha explicado cómo se puede obtener una señal de RF, se pasará a la aplicación de interés que es el desarrollo de un receptor para señales ADS-B.

### 2.1.1. Selección de antena

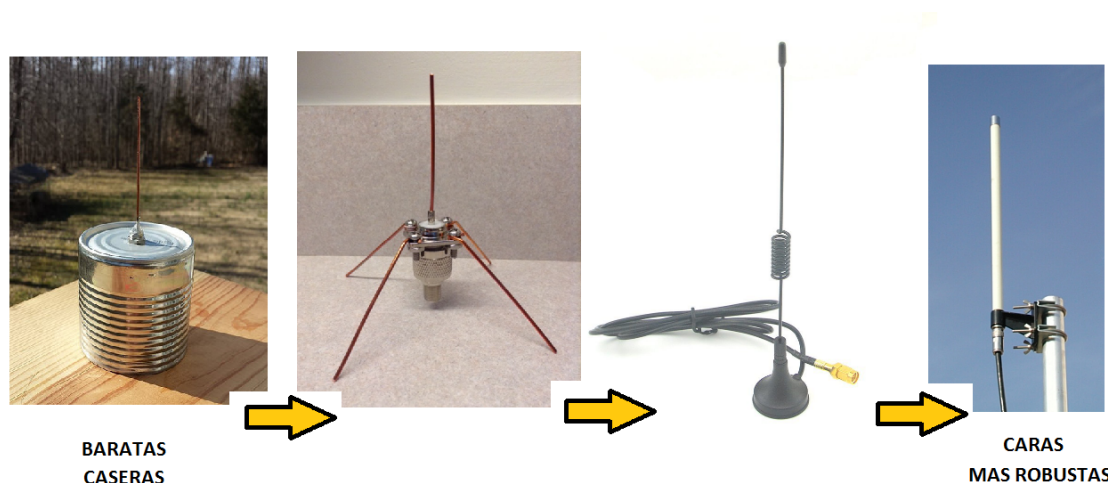
A la hora de elegir la antena se deben tener en cuenta algunos aspectos como el lóbulo de radiación, ganancia, frecuencia, ancho de banda donde mantiene varios parámetros constantes, impedancia de entrada, entre otros.

Los mensajes ADS-B son transmitidos en forma de broadcast con polarización ver-

tical, entonces, se necesitará una antena omnidireccional con esta polarización capaz de capturar señal proveniente de cualquier dirección. Además, es deseable lograr que la antena tenga mayor ganancia en los ángulos de elevación para los cuáles los aviones se encuentran lejos, ángulos entre los  $0^\circ$  y  $5^\circ$ , para compensar las pérdidas en el espacio libre.

La señal ADS-B está modulada en 1090MHz con un ancho de banda que concentra la mayor parte de la energía en  $2MHz$ . Es importante que la antena tenga buena respuesta en ese ancho de banda entorno a esa frecuencia, es decir que mantenga la impedancia de entrada especificada, el lóbulo de radiación se mantenga omnidireccional y mantenga las ganancias esperadas.

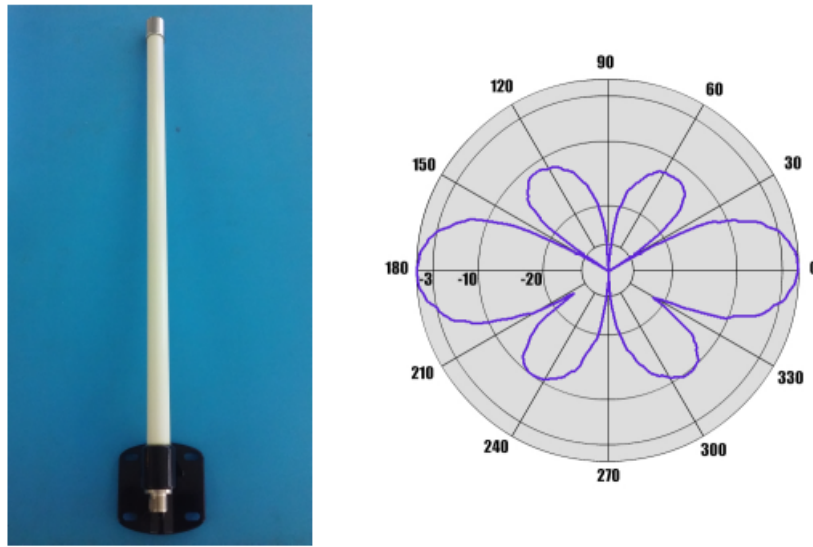
Es relativamente sencillo hacer una antena capaz de recibir señales ADS-B, ya que la longitud de onda para esta señal es de  $27,5cm$ , medida ni muy chica ni muy grande. Pasando por dipolos, monopolos con plano de tierra, antenas colineales, etc., las soluciones para capturar señales son muchas, desde antenas hechas de forma casera y barata a antenas comerciales más robustas y precisas, como se muestra en la figura 2.2.



**Figura 2.2:** Imagen de las diversas opciones de antenas que existen para tomar señales ADS-B. De izquierda a derecha, Monopolo con plano de tierra logrado por una lata (casero), Monopolo *spider* (casero), Monopolo ADS-B *Aerial* (comercial) y Monopolo GP-1090 (comercial).

Si bien se han probado antenas hechas de forma casera y algunas otras comerciales, para este trabajo, se utilizó una de las mejores soluciones comerciales de antenas para ADS-B. La GP-1090 es una antena colineal de cuatro segmentos de media longitud de onda [7]. Su costo ronda los US\$ 100 y se han adquirido dos de estas para implementaciones que requieran más de una antena.

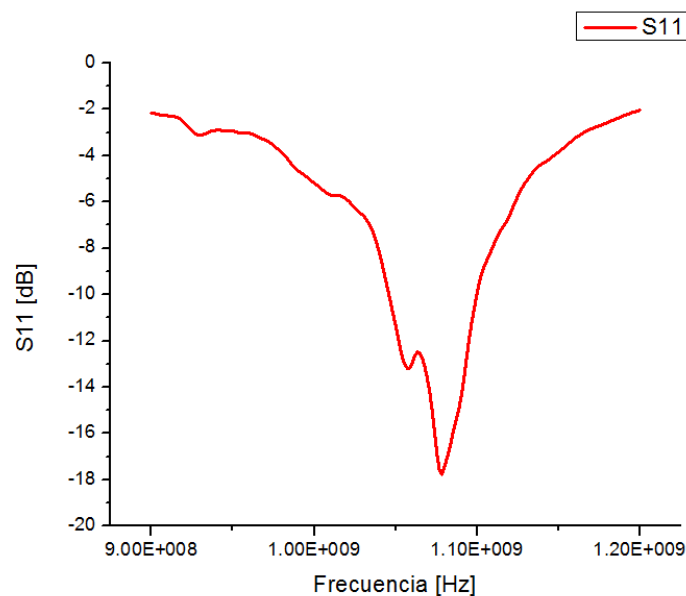
Para una recepción óptima de las señales ADS-B, es importante que haya línea de vista entre la antena y las aeronaves con capacidad para transmitir estas señales. Es por eso que la antena GP-1090 es una gran solución para hacer instalaciones en alturas, viene con protección para lluvias y cables de baja pérdidas de hasta 10m de largo.



**Figura 2.3:** Antena GP-1090 junto a su patrón de radiación visto en elevación. En azimuth la antena tiene un patrón omnidireccional.

La antena es de banda angosta para el rango de frecuencias 1070 a 1110  $MHz$  y logra una máxima ganancia de  $5dBi$ . Es deseable que la adaptación de la antena sea buena en todo el ancho de banda de interés. Para eso, se toma como medida que el coeficiente de reflexión esté por debajo de los  $-10dB$ . En la figura 2.4, se presenta una medición del coeficiente de reflexión de la antena GP-1090, en la que se observa que está por debajo de los  $-10dB$  en el ancho de banda de la señal ADS-B, alcanzando un valor de  $-18dB$  en  $1090MHz$ .

La adaptación a la frecuencia de  $1090MHz$  es bastante buena y el coeficiente de reflexión es de  $-18dB$ , como se puede ver en la figura 2.4.



**Figura 2.4:** Adaptación de la antena GP-1090, dada por el parámetro  $s_{11}$



### 2.1.2. Amplificador de bajo ruido, LNA

Como se vio anteriormente, es importante la utilización de un amplificador de bajo ruido, bien para acondicionar los niveles de señal como para lograr una baja figura ruido del sistema de recepción completo. Es importante que el LNA se encuentre lo más cerca posible a la antena ya que, si esta se encuentra lejos, todos los metros de cable que hayan entre la antena y el LNA atenuarán el nivel de la señal recibida y además introducirán ruido que luego será imposible eliminar por filtrado. Esto se verá reflejado en un parámetro llamado figura de ruido que se tratará más adelante en el trabajo.

Junto con la antena GP-1090, el vendedor ofrece un LNA optimizado para recibir señales de respuesta de Modo S. Este dispositivo viene con protección para lluvia y con la posibilidad de alimentarlo a través del mismo cable de RF, es decir que la tensión continua necesaria para polarizar el amplificador viajará por el mismo cable por donde van las señales ADS-B. Esto es sumamente útil porque, al estar el amplificador a grandes alturas, llegar con fuentes de alimentación hasta allí complicaría la instalación.

El amplificador viene junto a los cables de 10m de baja pérdidas para 1090MHz y junto con el alimentador de la señal. El costo de los tres componentes (LNA, cables y inyector de DC) ronda los US\$ 170 y, al igual que con la antena, se han comprado dos conjuntos.



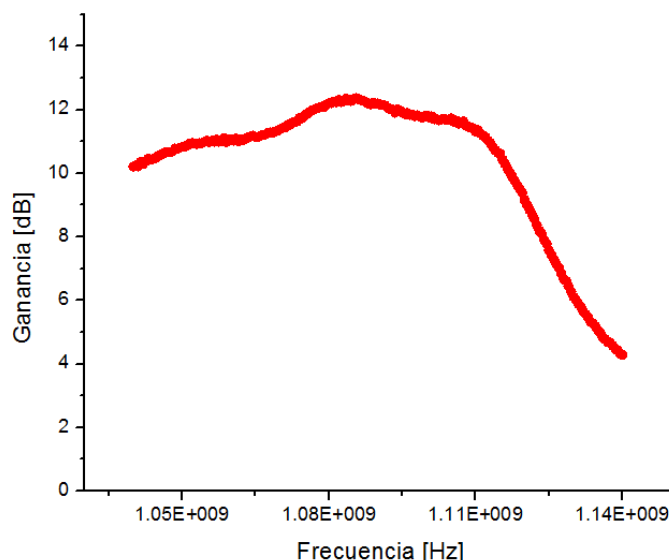
**Figura 2.5:** De izquierda a derecha, amplificador de bajo ruido, cables de baja pérdida, DC inyector para alimentación.

Algunas de las características técnicas del LNA son:

Rango de frecuencias	1030 – 1090MHz
Ganancia	12dB
Figura de ruido	0,9dB
Alimentación	12V <sub>DC</sub> sobre coaxial
Consumo de corriente	100mA
Conectores	2 conectores N hembra
Atenuación cables	15dB/100m a 1090MHz

También, se midieron los parámetros  $S$  del amplificador con un analizador de redes.

En la figura 2.6, se muestra el parámetro  $S_{21}$  que indica la ganancia del LNA para un rango de frecuencias. De la figura, se ve que el LNA alcanza una máxima ganancia en  $1090\text{MHz}$ , llegando a una ganancia de  $12,5\text{dB}$  la cuál es muy cercana a la informada por el vendedor.



**Figura 2.6:** Ganancia del LNA adquirido en función de la frecuencia.

### 2.1.3. Filtro pasabandas

Una vez amplificada la señal, es necesario filtrar todas los componentes de frecuencia que no son de interés que también fueron amplificados. Hacer esto mitigará los efectos de posibles no linealidades y disminuirá el ruido, ya que se limitará el ancho de banda de la señal de interés.

La solución elegida fue usar un filtro fabricado por la empresa FlighAware, la cuál ofrece como principal producto el seguimiento global de aeronaves que utilicen *transponders* con capacidad de señales de Modo S. El costo del filtro es de  $US\$ 15$  y se puede encontrar en tiendas virtuales, como Amazon.

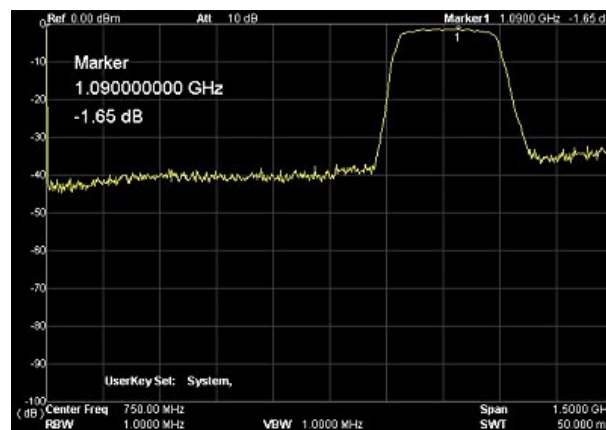
La función transferencia del filtro se puede ver en la figura 2.8. El ancho de banda del filtro es de aproximadamente  $180\text{MHz}$ . Además, se observa que las pérdidas por inserción son de aproximadamente  $1,65\text{dB}$ , las cuales deben ser contempladas a la hora de hacer el cálculo de enlace.

### 2.1.4. Radio definida por software, SDR

Habiendo recibido, amplificado y filtrado la señal, etapa llamada *front-end* de RF, faltan algunos pasos para obtener la señal limpia en banda base. Hoy, existen unos



**Figura 2.7:** Imagen del filtro pasabandas para señales de Modo S



**Figura 2.8:** Función transferencia en función de la frecuencia del filtro pasabanda para señales de Modo S.

dispositivos llamados radios definidas por software (*Software Defined Radio*, SDR). La función de un SDR es definir parámetros importantes de la cadena de recepción o transmisión, mediante la utilización de *software* [8]. Estos parámetros son, por ejemplo, elegir el ancho de banda de un filtro, la ganancia de amplificadores, la frecuencia de oscilación de un mezclador, la frecuencia de muestreo de un ADC, entre muchos otros. La utilización de este tipo de dispositivos permite realizar diferentes tipos de proyectos. Por ejemplo, se puede realizar un modem *Wi-Fi*, un receptor o transmisor de FM e, incluso, un receptor para señales del tipo ADS-B.

Existen diferentes ofertas en el mercado, desde opciones más económicas pero con menos prestaciones hasta opciones más robustas con la capacidad de cubrir una amplia cantidad de aplicaciones de forma óptima, obviamente estas serán más caras. Para este proyecto, se han elegido dos opciones adecuadas para el prototipado de la aplicación, una barata y otra de precio superior.

### SDR RTL 2832U R820T

Esta SDR tiene la particularidad de que no estaba destinada a ser lo que es hoy. Se creó con el objetivo de ser un sintonizador de televisión digital en Japón. Sin embargo, alguien se dio cuenta de que el *hardware* utilizado por este dispositivo era fácilmente desbloqueable y así hacerlo funcionar como una SDR, dentro de un rango de frecuencias limitadas. En la figura 2.9, se puede ver una imagen de este dispositivo. El diagrama de bloques de esta SDR fue el que se presentó anteriormente en la figura 2.1, para caracterizar un receptor de RF genérico. El precio del dispositivo se encuentra entre *US\$ 10* y *US\$ 25* en mercados *online*.



**Figura 2.9:** Imagen del SDR RTL 2832U R820T adquirido. Se ha modificado su conector original por uno SMA hembra.

Dentro de sus características técnicas, se pueden detallar las siguientes de relevancia:

I/O	1 Rx SMA hembra.
Rango de frecuencias	$500\text{KHz} - 1,766\text{GHz}$
Frecuencia de Muestreo	$< 2,4\text{MSamples/s}$
ADC	8 bits
Decodificación	Banda base I-Q
Figura de ruido	$< 4\text{dB}$
Max. Pot. Entrada	$10\text{dBm}$

De esta tabla, se puede ver que este dispositivo es un buen candidato, al menos para el prototipo, de un receptor de señales ADS-B. La frecuencia de  $1090\text{MHz}$  se encuentra dentro del rango admisible, la potencia de entrada máxima supera lo requerido, debido a que el rango dinámico de estas señales tiene un máximo en  $-40\text{dBm}$ , y posee una figura de ruido aceptable considerando que se utilizará un LNA cercano a la antena.

Quizás el mayor inconveniente se da en la frecuencia de muestreo, ya que la señal de ADS-B cambia de estado cada  $0,5\mu s$ , debido a su codificación Manchester. Como la frecuencia de muestreo máxima es de  $2,4MSamples/s$ , solo se toma una muestra, muy pocas veces dos, por cada cambio de estado. La baja frecuencia de muestreo, para esta aplicación, puede complicar los criterios de decisión en un entorno donde el ruido juegue un papel importante, o cuando las muestras se tomen en los flancos de esos estados. Idealmente sería adecuado contar con una SDR que pueda muestrear la señal al menos a  $4MSamples/s$ , y asegurar un mínimo dos muestras por estado.

### SDR USRP B210

Se ha introducido una solución sencilla y económica para realizar un receptor ADS-B, como es el dongle RTL2832U R820T. Éste tiene algunos inconvenientes con respecto a la frecuencia de muestreo que complicarán las decisiones de los bits. Es por eso que también, se optó por adquirir una SDR mucho más robusta que permita desarrollar el proyecto en un escenario real de forma óptima.

Esta opción es la USRP B-210 fabricada por la empresa ETTUS [9]. Si bien el precio es mayor ( $US\$ 1400$ ), cuenta con muchas más prestaciones que la otra SDR. Como tener dos entradas receptoras y dos transmisoras con la posibilidad de hacer *full-duplex*, anchos de banda analógicos mayores, frecuencias de muestreo más amplias, la capacidad de hacer el procesamiento dentro de la misma placa gracias a la FPGA que contiene la placa, entre otras características que hacen que el dispositivo no solo pueda ser utilizado para prototipado, sino para solución final de la aplicación.

Características técnicas:

I/O	2 Rx y 2 Tx SMA hembra.
Rango de frecuencias	$70MHz - 6GHz$
Frecuencia de Muestreo	$< 61,44MSamples/s$
ADC	12 bits
DAC	12 bits
Decodificación	Banda base I-Q
Figura de ruido	$< 8dB$
Max. Pot. Entrada	$-15dBm$
Max. Pot. Salida	$20dBm$
FPGA	Spartan 6 XC6SLX150

En las figuras 2.10 y 2.11, se pueden ver una imagen de la USRP B210 que fue comprada, y el diagrama de bloques de la cadena de transmisión y de recepción de esta SDR.

En la figura 2.11, solo se ve el esquema de un receptor y de un transmisor, los otros



**Figura 2.10:** Fotografía de la SDR USRP B210 adquirida.

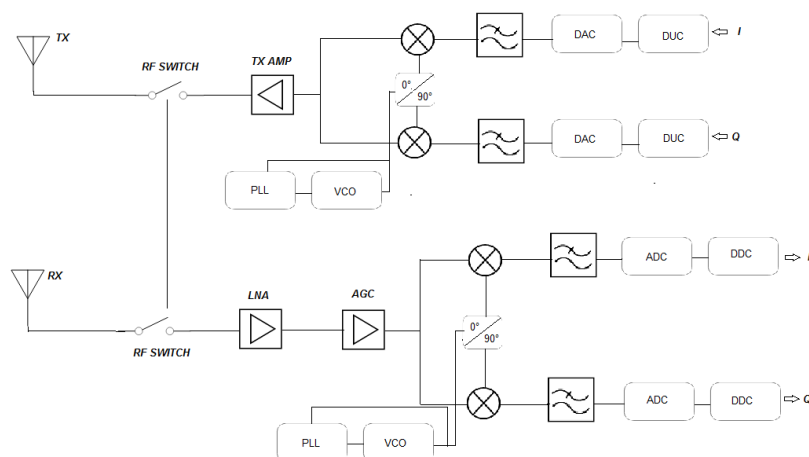
dos son idénticos. Al contrario que la SDR RTL 2832U R820T, la USRP B210 no tiene bajada a IF, sino que hace la bajada a banda base directamente. La bajada a banda base es puramente analógica [9].

Con respecto a la aplicación de interés, la frecuencia de muestreo de la USRP permite tomar más de una muestra por estado, por lo que la señal digitalizada es más robusta a la hora de determinar que bit (o símbolo) fue transmitido. Además, tener un ADC de 12 bits brinda una señal más fidedigna y con menos ruido de cuantización. Al tener dos entradas de recepción, es posible implementar aplicaciones como dirección de arribo de la señal, midiendo la fase con la que llega la señal a cada puerto receptor. También, el contar con salidas de transmisión permitirá desarrollar un simulador del *transponder* que se utilizará para probar el funcionamiento correcto del receptor desarrollado. Por último, como la USRP cuenta con una FPGA, será posible realizar etapas de procesamiento dentro de la placa y, de esta forma, optimizar el receptor para que procese en tiempo real, aprovechando la capacidad de computo de estos dispositivos.

## 2.2. Presupuesto

Realizar un receptor de señales ADS-B resulta más barato que otros sistemas de vigilancia, como los sistemas de radares primarios y secundarios. Uno de los motivos es que en ADS-B no existe la necesidad de transmitir información desde la estación base, tampoco hace falta hacer un seguimiento por aeronave debido a que las antenas son omnidireccionales, ni la necesidad de implementar grandes arreglos de antena. Todos esos factores hacen que el precio final del sistema de vigilancia aumente.

Se hará un análisis del presupuesto de un sistema de recepción ADS-B para diferentes casos de uso. No se tendrá en cuenta en el presupuesto el valor del equipo de



**Figura 2.11:** Diagrama de bloques de un canal de recepción y un canal de transmisión de la SDR USRP B210.

procesamiento. Para este trabajo, se utilizó una computadora de escritorio con CPU de  $2,2GHz$  de frecuencia de reloj, 2 núcleos de procesamiento y  $8GBytes$  de memoria RAM. Si bien el factor procesamiento es un punto clave a la hora de hacer un sistema ADS-B, queda a criterio de cada uno elegir el procesador.

Antena GP-1090	US\$ 100
Antena ADS-B <i>Aerial</i>	US\$ 9
LNA + cables	US\$ 170
Filtro pasabandas	US\$ 15
SDR RTL 2832U R820T	US\$ 25
SDR USRP B210	US\$ 1400

Si lo que se desea es hacer un receptor a modo de *hobbie* para empezar a incursionar dentro del mundo de la navegación aérea, bastará solo con comprar una antena barata como la ADS-B *Aerial* y un SDR RTL 2832U R820T, lo cual daría un presupuesto de US\$ 34. En cambio, si lo que se quiere es hacer un prototipado de un receptor ADS-B con vías a un producto comercial, es necesario invertir más. Se recomienda la compra de la antena GP-1090, un LNA junto a los cables de conexión y el alimentador, un filtro pasabandas y una SDR USRP B210, lo que se presupuesta en US\$ 1685. Si al prototipo anterior se le quiere integrar un sistema de dirección de arribo es necesario comprar 2 antenas, 2 LNAs y 2 filtros además de la SDR, eso daría un valor de US\$ 1970.

Hoy, el precio de un producto final de recepción ADS-B se encuentra entre los US\$ 150000 y US\$ 300000. Ese producto es muy completo y cuenta con certificados de sub-sistemas, sistemas de validación y monitoreo, certificados de procesos de *softwares*, procesamiento en tiempo real, comunicación con las ATC, etc. Ese valor agregado hace

que el precio aumente. De todos modos, estos sistemas de vigilancia siguen siendo más baratos que la mayoría de los sistemas de radares, lo que hace que esté en la mira de todos.

## 2.3. Resumen Capítulo 2

Se han definido los dispositivos necesarios para el desarrollo de un receptor de señales RF, más precisamente, un receptor para señales del tipo ADS-B.

Se establecieron las características que deben tener las antenas, los amplificadores y los filtros dentro de la etapa de *front-end* de RF. Luego, se mostró la necesidad de utilizar unos dispositivos llamados SDR, los cuáles son de gran utilidad para definir parámetros de elementos de la cadena de recepción mediante la utilización de *software*. Esto permitirá hacer un prototipado y elegir los mejores parámetros para un receptor óptimo. También, se comentaron diferentes opciones del mercado y qué ofrece cada una a la aplicación de interés. Finalmente, se estimaron presupuestos para desarrollar sistemas de recepción ADS-B con diferentes objetivos.

Una vez implementada toda la cadena de recepción necesaria para obtener una señal de ADS-B en banda base, sigue una etapa de procesamiento, que se hará cargo de detectar estas señales y decodificarlas para luego utilizar esos datos en alguna aplicación destinada al usuario.



# Capítulo 3

## Procesamiento señal ADS-B

*“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”*

— Albert Einstein

Habiendo establecido el *setup* de dispositivos y parámetros necesarios para poder obtener los mensajes del tipo ADS-B, es necesario implementar una lógica de procesamiento para el receptor. Esta lógica será la encargada de detectar si la señal deseada se encuentra o no y, en caso de que esté, interpretar su contenido según el protocolo establecido por la ICAO [6].

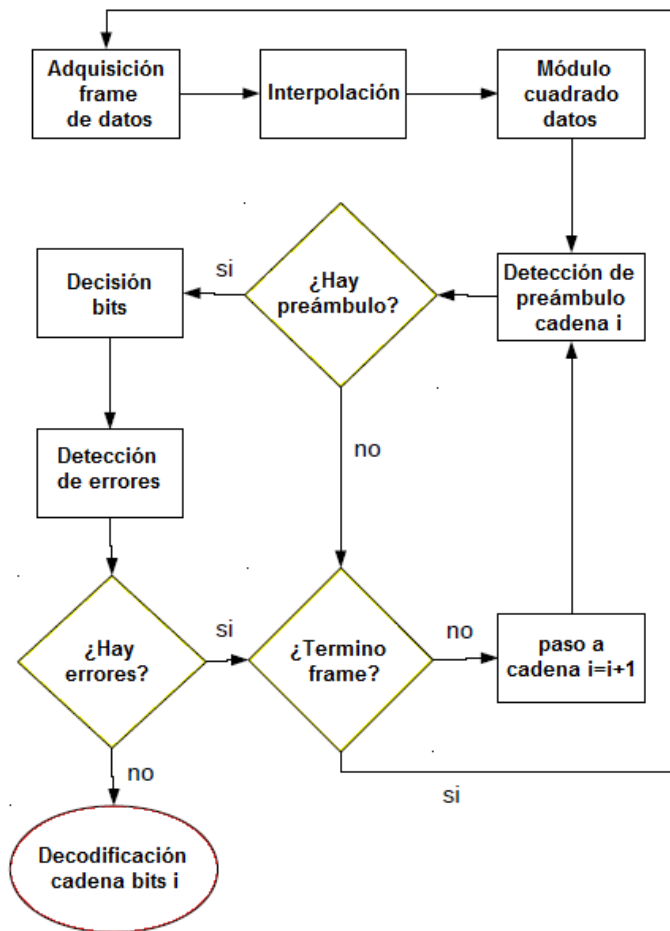
Esta etapa del receptor, se dividirá en dos secciones. La primera, en este capítulo, será una sección en donde se explicará cómo detectar la señal de ADS-B, hacer la decisión de bits y las diferentes implementaciones que se han aplicado. La segunda, en el capítulo 4, será una sección donde se explicará la decodificación de esa señal según las normas.

### 3.1. Detección y decisión sobre señales ADS-B

En la figura 3.1, se muestra un diagrama de bloques genérico de las etapas de procesamiento necesarias para obtener la cadena de bits que se tiene que decodificar. Se hará una explicación detallada de cada etapa del procesamiento.

#### 3.1.1. Captura de datos

Para la captura de datos es necesario entender el funcionamiento interno de las SDR, en particular de las dos mencionadas en el capítulo 2, y que son las plataformas disponibles para realizar el proyecto. Por lo general, todas las SDR vienen con un conjunto de funciones llamadas API (*Application Programming Interface*), para hacer la interacción entre el software y el hardware de interés. Ejemplos de estas API pueden



**Figura 3.1:** Diagrama de bloques de la etapa de procesamiento encargada de obtener los mensajes que luego se decodificarán.

ser las interfaces encargadas de sintonizar la frecuencia de portadora de la radio, elegir la ganancia de los amplificadores dentro de la SDR, elegir la frecuencia de muestreo del ADC, entre otros.

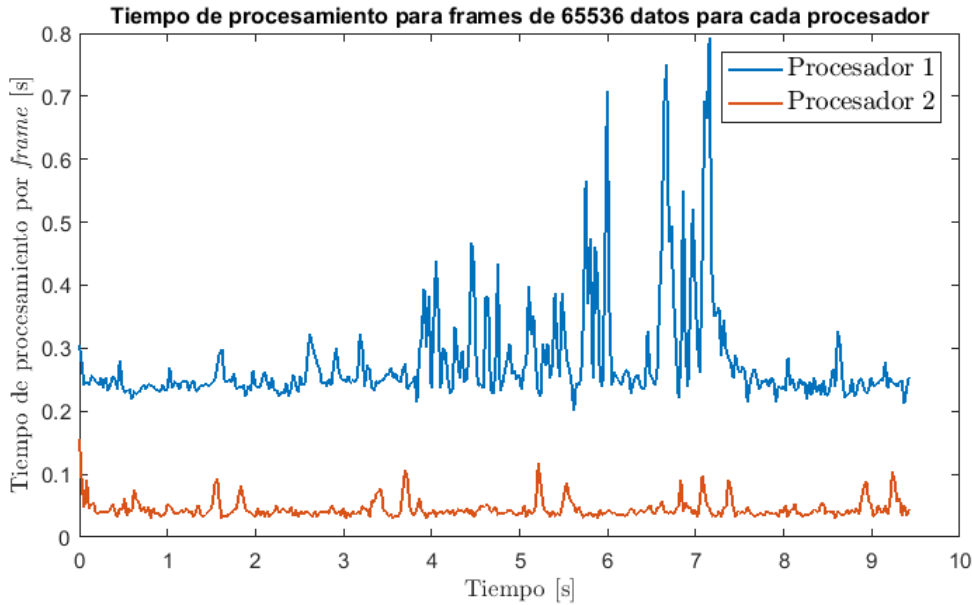
Las dos SDR elegidas hacen decodificación en fase y cuadratura de la señal, es decir, se obtiene una representación compleja por cada muestra. Esas muestras que la SDR le entrega al software vienen en paquetes de muchas muestras llamados *frames*. El tamaño de estos paquetes también es un parámetro manejable por el programador. Se debe pensar en una lógica de procesamiento que contemple que las muestras de la señal vendrán en *frames*, y elegir el tamaño de *frame* óptimo para hacer un procesamiento adecuado para los requerimientos, en este procesamiento en tiempo real o lo más cercano posible.

Por ejemplo, si se elige un tamaño de frame de  $2^{17}$  muestras a una frecuencia de muestreo de  $4M\text{Samples}/s$ , la duración de ese paquete de datos es de  $0,032768s$ , por lo que se debe asegurar que el tiempo de procesamiento de todo ese frame sea menor a ese tiempo. Si el procesamiento supera la duración en tiempo del frame tomado, el

procesamiento ya no será en tiempo real, ya que para la próxima toma de datos, se habrá perdido parte de la señal. En la figura 3.2, se puede ver el tiempo de procesamiento por frame para dos implementaciones de receptores ADS-B.

Se pueden ver claras diferencias entre los procesadores 1 y 2 (se explicarán más adelante en este capítulo): uno tiene un promedio de procesamiento por frame de 0,04s, cercano al ideal, mientras que el procesador 1 tiene un promedio de procesamiento por frame de 0,25s con picos cuando hay más densidad de mensajes ADS-B. Se ve una clara mejoría de uno respecto al otro, esas mejoras se verán más adelante dentro de este capítulo.

Si bien es importante elegir adecuadamente los parámetros de la SDR y optimizar las funciones que se utilizarán, hay limitaciones de recursos que no se podrán superar. Estas barreras son, por ejemplo, el tipo de procesador, el lenguaje de programación, la memoria de la computadora, entre otras. La única forma de hacer esas mejoras es migrando a otras plataformas, lo cuál requiere tiempo y dinero. Como el objetivo de este trabajo no es el de dar un producto con salida al mercado de sistemas de vigilancia, sino el de generar los conocimientos que permitan hacer un receptor ADS-B, se mencionan estos temas sin mayor detalle, pero dejando la inquietud planteada acerca de las limitaciones existentes.



**Figura 3.2:** Comparación entre los tiempos de procesamiento de dos implementaciones de procesadores de señal ADS-B. El tamaño de cada *frame* es de  $2^{17}$  muestras.

### 3.1.2. Interpolación de los datos

Ahora, se describirá una parte que no es obligatoria para el procesamiento, pero que asegura contar con un número mínimo de muestras por bits, en particular, cuando

la frecuencia de muestreo no coincide con un múltiplo par del ancho de banda de la señal ADS-B.

El ancho de banda de la señal ADS-B en 1090MHz es de 4MHz, considerando esta medida en el primer cruce por cero dado en  $1090MHz \pm 1/T_c$ , siendo  $T_c = 0,5\mu s$ . Al llevar la señal a banda base, el ancho de banda será la mitad, debido a que  $\Delta B_{banda\ base} = 1/2\Delta B_{pasabandas}$ . Para tener al menos una muestra por *chip* se debe muestrear la señal a una tasa de  $fs = 2MSamples/s$ , pero una muestra puede ser insuficiente, ya que ésta puede caer en algún flanco y de esa forma empeoraría la detección. Por eso, se muestreará como mínimo a  $4MSamples/s$ , que es la tasa mínima que cumple con el teorema de muestreo de Nyquist ( $fs \geq 2 \cdot \Delta B$ ) [10] y, además asegura dos muestras por *chip*, haciendo que al menos una no caiga en un flanco.

Lamentablemente, el RTL 2832U R820T tiene una frecuencia de muestreo máxima de  $2,4MSamples/s$  que no alcanza el límite propuesto. De todos modos, cuando se use la SDR RTL, se hará el muestreo a la máxima frecuencia posible, es decir,  $2,4MSamples/s$ . Luego, se hará una interpolación en un factor de al menos 5. La selección del factor 5 se debe a que se busca alcanzar un número entero par de muestras por *chip*. Si no se usa el interpolador el número de muestras promedio por *chip* será 1,2, es decir, que uno de cada cinco *chips* contará con 2 muestras, mientras que los otros solamente 1 muestra. Esto provocaría desequilibrios a la hora de hacer la decisión de bits que se verá más adelante. En cambio, interpolando por un factor 5, se asegurará un mínimo de 6 muestras  $= 5 \cdot 1,2$  por *chip*. El interpolador consiste en un sobremuestreo del factor deseado, seguido de un filtro pasabajos FIR de raíz de coseno elevado con factor de *roll-off*  $\alpha = 0,5$ , que elimina las replicas en frecuencia generadas por el sobremuestreo. Cabe aclarar que el hacer esta interpolación no aportará más información de la que ya se tiene, solo facilitará la forma de procesar la señal.

### 3.1.3. Módulo cuadrado de la señal

Las muestras con las que se trabajará están representadas en su forma compleja, y el modelo de señal ADS-B está representado por valores reales positivos, idealmente ceros y unos. La forma de hacer el procesamiento es tomando la envolvente de las muestras complejas. Esto se puede hacer calculando el módulo cuadrado (potencia) de la señal de la siguiente forma,

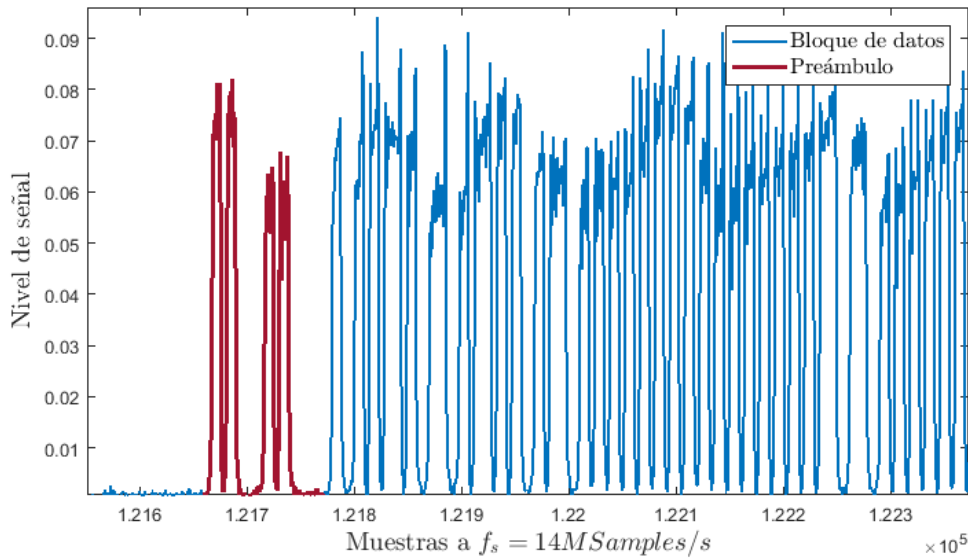
$$E(n) = I^2(n) + Q^2(n), \quad (3.1)$$

donde  $I$  y  $Q$  son la representación en fase y en cuadratura respectivamente, mientras  $E$  es el módulo cuadrado (potencia) de la muestra  $n$ . Este procedimiento se debe hacer en cada muestra del frame capturado para poder seguir con el procesamiento de la señal.

### 3.1.4. Detección de preámbulo

Esta etapa de procesamiento es sin dudas una de las más importantes, ya que es la etapa que seleccionará las candidatas a señal ADS-B. Hay muchas opciones para hacer este tipo de detección, unas más eficientes que otras y pensadas para diferentes tipos de procesador. En este trabajo, se implementan tres tipos de detección diferentes, dos pensados para software y otro en hardware para ser implementado en una FPGA.

Como se ve en la figura 3.3, una señal ADS-B contiene un preámbulo y sigue de una cadena de bits que contienen el mensaje.



**Figura 3.3:** Parte de una señal ADS-B capturada por el receptor desarrollado en SDR USRP B210, a una frecuencia de muestreo de  $14M\text{Samples/s}$ . La primeras muestras corresponden al preámbulo de la señal, mientras que las siguientes, corresponden al mensaje en sí.

Para tener certeza de que la señal es del tipo ADS-B, se necesita que haya una correlación con el preámbulo que supere cierto umbral. A continuación, se mostrará como hacer la detección de preámbulo para dos implementaciones diferentes de procesador hechas en software.

#### Detección de preámbulo para procesador 1

Este tipo de detección de preámbulo consiste en dos etapas principales. Una etapa de selección de cadenas candidatas, éstas son fragmentos del *frame* de datos capturado donde se considera que puede haber una señal ADS-B y, una segunda etapa que correlaciona de forma normalizada las cadenas candidatas con el preámbulo. Si pasa estas dos etapas, ese segmento de señal sea muy probablemente una señal que se encuentra dentro del protocolo del Modo S.

En la primera etapa, se calcula el piso de ruido del frame de datos, este proceso se hace promediando los valores en donde se sabe que no hay mensaje. Luego, si en

alguna parte la señal supera  $k$  veces el piso de ruido, donde  $k$  es parametrizable, se toma todo un bloque de datos de tamaño tal que pueda entrar una señal ADS-B dentro. Ese bloque comienza donde se encontró la muestra superadora del nivel de ruido hasta un largo mayor al tamaño de un mensaje ADS-B, pero no tan largo para invadir una futura posible señal.

Una vez que se tiene un segmento candidato, se pasa a correlacionar la señal normalizada con una señal que tiene la forma del preámbulo, también normalizada. Para normalizar, se divide la señal por la potencia promedio, y lo mismo se hace con el preámbulo. De esa forma, los valores de la correlación estarán entre cero y uno. Luego se detecta dónde ocurre el máximo de correlación, y si éste supera un cierto umbral, se puede asegurar que hay presencia de una señal de interés. El punto en donde se da el máximo de correlación es donde comienza el preámbulo, por lo que si se ha detectado señal el mensaje comienza  $8\mu s$  después de ese punto de detección.

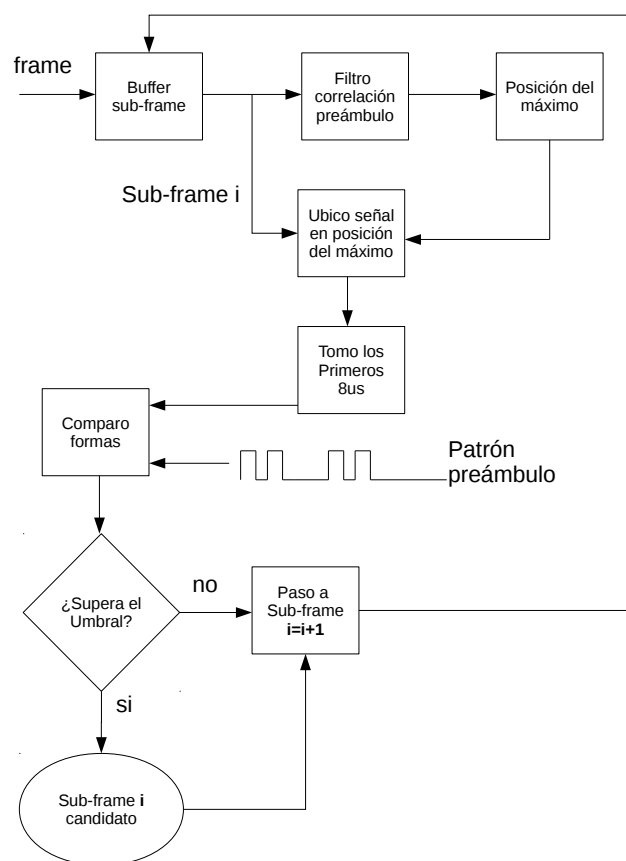
Esta forma de detección permite encontrar señales ADS-B de forma correcta, pero no es óptima. La primera etapa de selección de señales candidatas es un paso que puede ser evitado, ya que la correlación compara la similitud en forma de la señal, y no de energía. Entonces, si hay presencia de señal ADS-B con bajo nivel de potencia, también podría ser detectada, cosa que con este detector no sucede. Es cierto que de esta forma también habrá algunos falsos positivos, que de todos modos serán descartados en etapas posteriores del procesamiento. Además, tampoco es eficiente en tiempo, se puede ver de la figura 3.2 que el procesador 1 es 6, 25 veces más lento que el procesador 2, donde una de sus diferencias es debida al detector de preámbulo que utilizan.

### Detección de preámbulo para procesador 2

Se ha visto que el detector de preámbulo es un eslabón muy importante para la realización de un receptor de ADS-B, es por eso que el objetivo será optimizarlo lo más posible para bajar los tiempos de procesamiento y aumentar la probabilidad de detección. Para hacer esta optimización, se eliminará de la cadena el selector de señales candidatas a partir de su energía y se agregará más poder de procesamiento, convirtiendo el código hecho en MATLAB a código precompilado en lenguaje C, lo que hará más rápida esta parte del procesamiento.

En la figura 3.4, se ve un diagrama de flujos del procesamiento en esta etapa. Primero, se dividirá el *frame* de datos original en varios *sub-frames*, los cuales irán almacenados en un *buffer*. Luego, se hará pasar a cada *sub-frame* por un filtro de correlación. Este filtro de correlación, es un filtro de tipo FIR, donde sus coeficientes corresponde a la forma del preámbulo de las señales de respuesta del Modo S. Maximiza la relación señal a ruido al momento de tomar la decisión. Una vez filtrado el *sub-frame*, se busca el máximo de correlación. Ese máximo, en caso de ser una señal del Modo S,

corresponde a la ubicación del inicio del preámbulo. Habiendo hallado esa ubicación, es necesario ubicarse en esa posición temporal dentro del *sub-frame* correspondiente. A continuación, se toman los primeros  $8\mu\text{s}$  del *sub-frame* desde la posición hallada y se comparará ese fragmento de señal con la forma ideal del preámbulo, esto es necesario ya que el filtro correlador siempre devuelve un valor máximo de correlación, pero ese valor no asegura que haya presencia de señal. La comparación calcula un puntaje (inicialmente en 0), donde se ve que cada muestra siga la tendencia de la forma ideal. Si la muestra  $k$  sigue la tendencia, entonces, sumará 1 al puntaje, en el caso que no siga la tendencia, entonces, restará 1. Una vez calculado el puntaje total, se debe fijar un umbral de puntuación. Si el puntaje supera ese umbral, entonces, el *sub-frame* analizado es un candidato a señal del tipo ADS-B, en caso contrario, se descarta ese *sub-frame* y se analiza el próximo.



**Figura 3.4:** Diagrama de flujo de la detección de preámbulo de señal ADS-B del procesador 2.

Esta forma de detección es mejor, ya que se ahorra un paso de mucho costo compu-

tacional, y además, se implementan bloques optimizados (como el filtro de correlación y el buffer de datos) de MATLAB, que optimizan diferentes parámetros para el procesamiento de señales. Quizás el analizar en todos los *sub-frames* si hay señal ADS-B, aumente el tiempo de procesamiento. Pero de esta forma, se asegura que, aunque la señal sea demasiado pequeña, esta pueda ser analizada y detectada. De todas formas el tiempo de procesamiento es 6,25 veces menor y constante que el detector del procesador 1. Otro problema que puede aparecer en este tipo de procesamiento es que una señal sea cortada entre diferentes *sub-frames* y, de la forma que fue implementado el procesador, ese mensaje se descartaría haciendo que la probabilidad de detección ( $P_d$ ) disminuya.

### 3.1.5. Decisión de bits

Se sabe que los bits de un mensaje ADS-B están codificados en formato Manchester. El receptor dispondrá de ciertas muestras por tiempo de bit, según la frecuencia de muestreo que se utilice. Como las muestras que toma el receptor están contaminadas por ruido, se debe hacer un *test* de hipótesis para decidir qué bit ha llegado [11]. Se trabajará sobre dos hipótesis

$H_0$  : el bit que llega es un 0,

$H_1$  : el bit que llega es un 1.

Para decidir entre una hipótesis u otra se planteará una relación de verosimilitud a *posteriori* como se muestra a continuación

$$H_0 \quad \text{si} \quad \gamma = \frac{P(H_0|N \text{ muestras})}{P(H_1|N \text{ muestras})} > 1 \quad (3.2)$$

$$H_1 \quad \text{si} \quad \gamma = \frac{P(H_0|N \text{ muestras})}{P(H_1|N \text{ muestras})} < 1,$$

como encontrar las probabilidades a *posteriori* resulta complicado, se aplicará el teorema de Bayes para poder utilizar la probabilidad de las muestras dada una hipótesis, donde

$$\gamma = \frac{P(H_0|N \text{ muestras})}{P(H_1|N \text{ muestras})} = \frac{\frac{P(N \text{ muestras}|H_0) \cdot P(H_0)}{P(N \text{ muestras})}}{\frac{P(N \text{ muestras}|H_1) \cdot P(H_1)}{P(N \text{ muestras})}}. \quad (3.3)$$

Con esta nueva relación de verosimilitud y a partir de ciertas suposiciones, se podrá decidir entre bits. Se supondrá que las probabilidades  $P(H_0)$  y  $P(H_1)$  son iguales a 0,5, ya que se espera que lleguen la misma cantidad de ceros que de unos. Además, se considerará al ruido que contamina la muestras como blanco, aditivo y gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN), aunque esto no es del todo cierto, ya que



el filtrado de la señal a través de la cadena recepción correlaciona ese ruido, que al principio de la cadena se podía considerar AWGN. Si se toma esa decisión las cuentas serán más sencillas, pero a costa de disminuir la probabilidad de detección ( $P_d$ ). Con estas consideraciones la relación de verosimilitud será la siguiente

$$\gamma = \frac{e^{-\sum_{i=1}^{N/2} \frac{(x_i+A)^2}{2\sigma^2}} - \sum_{i=N/2+1}^N \frac{(x_i-A)^2}{2\sigma^2}}{e^{-\sum_{i=1}^{N/2} \frac{(x_i-A)^2}{2\sigma^2}} - \sum_{i=N/2+1}^N \frac{(x_i+A)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.4)$$

donde  $x_i$  es el valor de la  $i$ -ésima muestra,  $A$  es la amplitud de la señal y  $\sigma$  es el desvío estándar del ruido. Aplicando la función logaritmo en ambas partes de la igualdad y operando sobre esa ecuación, se obtiene un resultado matemático del *test* de hipótesis para poder decidir entre los bits del mensaje, como se ve de la ecuación 3.5.

$$bit = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^{N/2} x_i > \sum_{i=N/2+1}^N x_i \\ 0 & \text{si } \sum_{i=1}^{N/2} x_i < \sum_{i=N/2+1}^N x_i, \end{cases} \quad (3.5)$$

Ésta es una de las tantas hipótesis que se pueden aplicar, si se supone que el receptor se encuentra en un entorno de ruido AWGN. Si el radar se encuentra en un entorno donde la densidad de aeronaves volando es muy alta, entonces, muy probablemente aparezca un fenómeno llamado FRUIT [3]. El FRUIT es el acrónimo de respuestas falsas desincronizadas en tiempo. Éste es un tipo de ruido producido por respuestas que llegan al receptor al mismo tiempo. Por consecuencia del FRUIT, puede ser que las señales que deseen analizar estén pisadas por otras que no son de interés, a este fenómeno se lo denomina *garbling*. El *garbling* ocurre cuando hay solapamiento en el tiempo de los mensajes emitidos por diferentes *transponders*. Por lo tanto, la señal recibida estará degradada y, la complejidad del sistema de recepción deberá aumentar para distinguir entre mensajes solapados. El proceso de discriminar entre mensajes solapados se llama *degarbling*, donde se usan diferentes técnicas para la discersión de señales. Las técnicas utilizadas van desde sistemas de medición de fase de diferentes antenas receptoras, y otras técnicas que implementan ventanas de decisión que se apartan de la rectangular utilizada en la ecuación 3.5 [12]. Los ventaneos posibles pueden ser ventaneo triangular, ventaneo de Hamming, etc. En este trabajo, no se discutirá acerca de las técnicas de *degarbling* ni ninguna otra que repare una señal interferida, esto quedará para trabajos futuros.

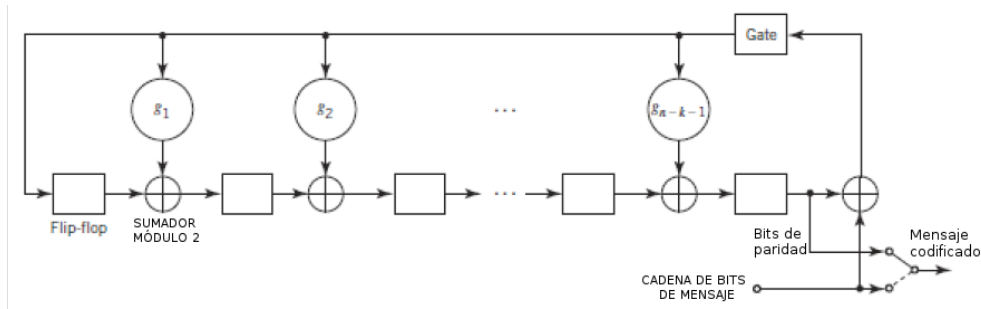
### 3.1.6. Detección de errores

Para finalizar esta etapa de procesamiento y entregar una cadena de bits para decodificar a los bloques encargados de ese trabajo, es necesario hacer detección de errores. La señal de ADS-B contiene un bloque de 24 bits de chequeo de paridad, los

cuales tienen una codificación de verificación de redundancia cíclica (*Cyclic Redundancy Check*, CRC) [13][14] con el siguiente polinomio generador:

$$G(x) = 1 + x^3 + x^{10} + x^{12} + x^{13} + x^{14} + x^{15} + x^{16} + x^{17} + x^{18} + x^{19} + x^{20} + x^{21} + x^{22} + x^{23} + x^{24}. \quad (3.6)$$

Para hacer este chequeo de paridad, se tomarán los 88 bits de mensajes ADS-B ya detectados y se pasarán por un sistema que genere el código CRC de 24 bits, como el que se muestra en la figura 3.5 para un caso genérico. Una vez que se genere el código de paridad a partir de la señal recibida, se comparará bit a bit el código de paridad generado con el código de chequeo de paridad recibido. Si todos los bits coinciden, se considera que el mensaje es válido y se decodifica. Si hay al menos un error, se descarta toda esa cadena de bits. Existe la posibilidad de corregir hasta dos errores, ya que la distancia Hamming entre mensajes es igual a 6 [12]. La corrección de errores no será un tema abordado dentro de este proyecto debido al tiempo requerido para su implementación. En la figura, se ve un ejemplo de cómo generar un código de chequeo de



**Figura 3.5:** Esquema de un sistema generador de código de chequeo de paridad CRC genérico.

paridad para un polinomio generador genérico, donde el coeficiente  $g_1$  es el coeficiente correspondiente al término independiente del polinomio. En este caso, el polinomio es de orden 24, por lo que el diagrama es mucho mayor, con 23 bloques de memoria, hechos con *flip-flops*. Explicando brevemente el diagrama de bloques, se tiene una cantidad de bloques de memoria igual al orden del polinomio generador menos uno. Se hace la suma en módulo 2 entre la salida de cada *flip-flop* y la multiplicación de la muestra del mensaje correspondiente a ese ciclo de reloj con el coeficiente del polinomio generador correspondiente a ese *flip-flop*. En cada ciclo de reloj, se genera una salida que responde al diagrama de la figura, la primera parte del código generado es el mismo mensaje, mientras que la segunda parte, se genera a través de las operaciones dadas por las compuertas *XOR*, los valores pasados guardados en memoria y el mismo mensaje.

## 3.2. Implementación de los bloques de procesamiento en FPGA

Se han visto las ventajas y desventajas de los procesadores 1 y 2, y cómo se podría optimizarlos a nivel *software*. Para hacer una implementación de un receptor ADS-B capaz de procesar en tiempo real, se realizó un prototipado de simulación en *Simulink* de la cadena de procesamiento del receptor ADS-B en código HDL, para que éste pueda ser implementado en una FPGA (*Field Programmable Logic Array*). Una FPGA permite hacer un procesamiento a nivel *hardware*, utilizando compuertas combinacionales y sincrónicas, como son los *flip-flops*, los registros desplazamiento, compuertas *AND*, *OR*, *XOR*, entre muchas otras [15]. A través de lenguajes como *VHDL* o *Verilog*, se puede instanciar este tipo de compuertas y crear procesos independientes capaces de hacer sus tareas en unos pocos ciclos de reloj. La implementación de una FPGA puede potenciar de gran forma la aplicación, hay que tener en cuenta si la capacidad de la FPGA que se utilice es capaz de soportar el diseño desarrollado.

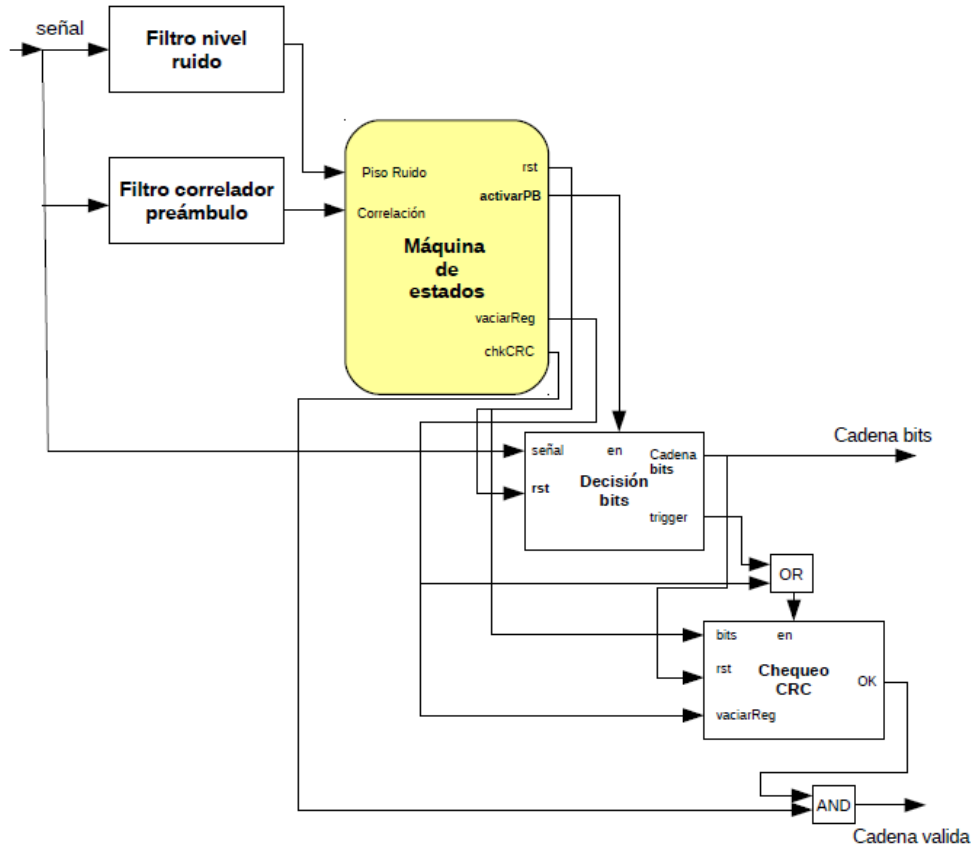
Para esta simulación, se ha llevado a lógica de compuertas toda la primera parte del procesamiento, desde la interpolación hasta el bloque encargado de hacer la detección de errores. Sin embargo, la parte que más difiere a los otros dos procesadores vistos es el detector de preámbulo, al cual se le prestará más atención.

La herramienta utilizada para esta prueba fue *Simulink*, un programa que permite realizar cadenas de bloques para diferentes procesamientos. Hay bloques optimizados para implementar lógica de compuertas llamados *HDL Coder Blocks*, estos bloques están pensados para ser implementados de forma sencilla y luego generar el código en *VHDL* o *Verilog* de manera automática, lo que hace muy simple su prototipado. Quedará para trabajos futuros llevar el código auto-generado por la herramienta de *software* e implementarlo en una FPGA, como la que posee la USRP B210.

### 3.2.1. Diseño del procesador 3

Esta implementación cambia significativamente con respecto a las otras que se han utilizado, ya que anteriormente se ha procesado por frame de datos, mientras en este tipo de procesamiento se procesa muestra a muestra, *clock a clock* [16]. En la figura 3.6, se observa un diagrama de bloques del detector completo, contemplando la detección de preámbulo, la decisión de bits y la detección de errores CRC.

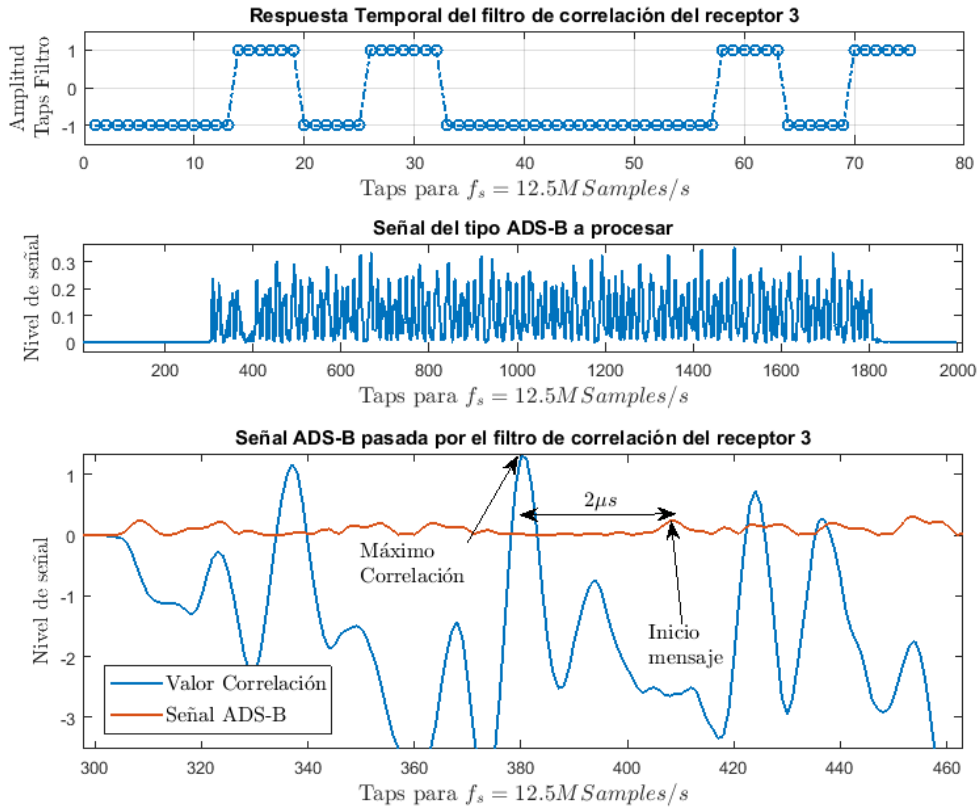
Dos diferencias que se ven respecto de los otros dos procesadores son que éste posee una máquina de estados y un filtro que mide el nivel de ruido. A pesar de que este procesador posee un filtro de correlación con el preámbulo como en el procesador 2, estos filtros no son iguales. El filtro correlador de este procesador también es un filtro FIR, pero los coeficientes de este filtro corresponden a los primeros  $6\mu s$  del preámbulo,



**Figura 3.6:** Diagrama de bloques del bloque de detección de señal ADS-B para implementar en una FPGA.

pero de forma espejada, es decir los primeros *taps* corresponden a la última parte del fragmento del preámbulo, y los últimos *taps* corresponden al inicio del preámbulo. Se ha aplicado este cambio ya que se detectó que en presencia de señal de Modo S habrá un máximo de correlación justo  $2\mu s$  antes del comienzo de la señal (sin contar el preámbulo). Esto sucede porque en el caso de que haya señal ADS-B, el punto de máxima coincidencia entre la señal y el filtro correlador se da cuando la señal ha atravesado  $6\mu s$  por el filtro. Entonces, si el preámbulo dura  $8\mu s$ , sólo quedarán  $2\mu s$  para el comienzo del mensaje [16]. Sabiendo que siempre sucede esto, se puede implementar una lógica consistente dentro de la máquina de estados, que será la encargada de generar señales de control hacia los diferentes bloques del detector. En la figura 3.7, se ve un ejemplo del proceso de cálculo de correlación y cómo efectivamente el máximo de correlación se da en donde se mencionó anteriormente.

El filtro de nivel de ruido es un filtro FIR, donde sus coeficientes son equivalentes a  $1/(N_{taps})$ . Por lo tanto lo que hace este filtro es sacar un promedio de  $N_{taps}$  = número de *taps* de la señal en cada instante. Ese valor es entregado en cada ciclo de reloj a la máquina de estados. Una vez que la señal haya pasado muestra por muestra por el filtro de correlación y el filtro de nivel de ruido, esos valores pasarán a ser evaluados

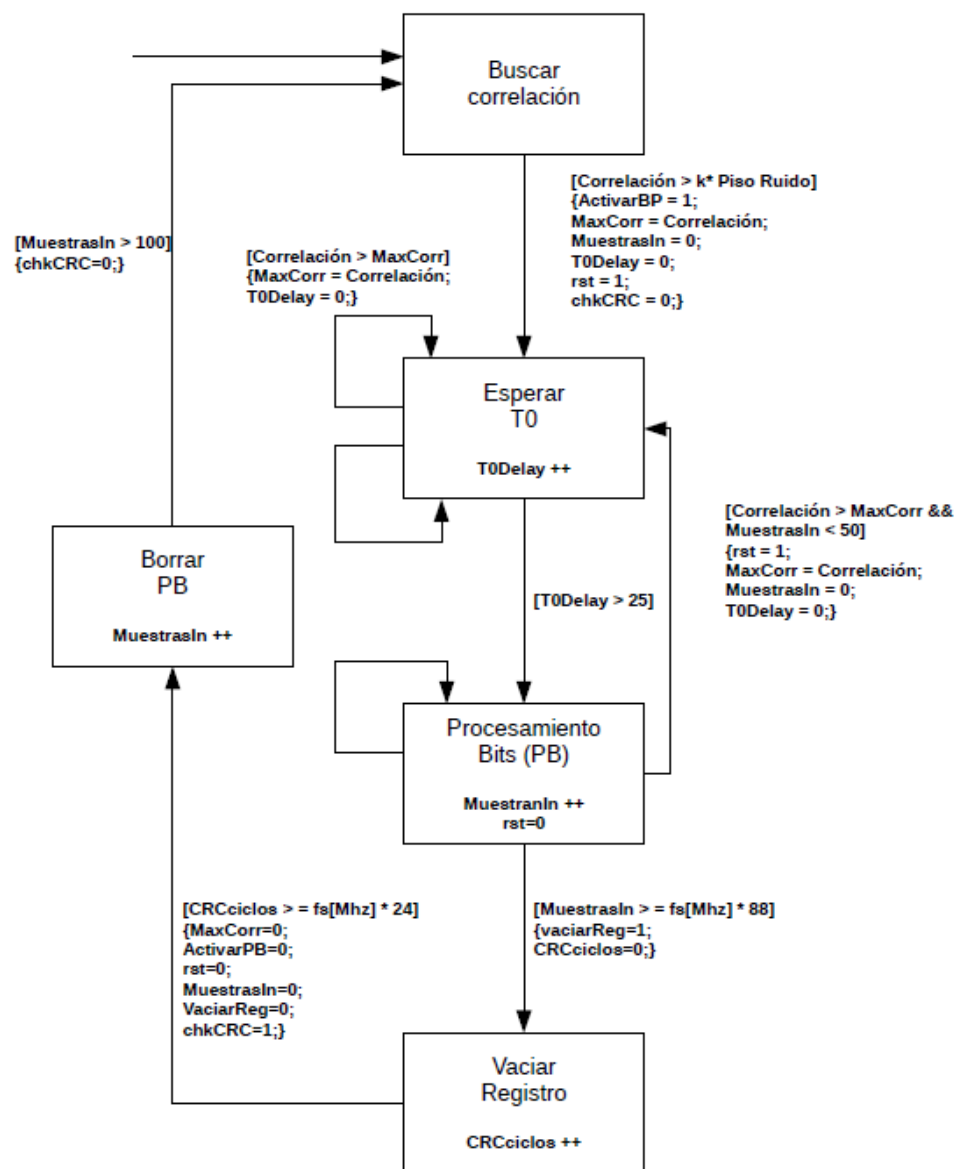


**Figura 3.7:** Ejemplo de filtrado de una señal ADS-B mediante el filtro FIR implementado en el procesador 3.

por una maquina de estados, encargada de emitir las señales de control que controlarán cada bloque de la cadena de procesamiento. Es imprescindible contar con estas señales de control, ya que se está diseñando un receptor sincrónico y es importante tomar decisiones dentro del ciclo de reloj correspondiente.

En la figura 3.8, se ve un diagrama de la maquina de estados pensada para este procesador. La misma trabaja a una frecuencia de reloj igual a la frecuencia de muestreo a la salida del interpolador. Es importante que el *clock* y la frecuencia de muestreo final coincidan. Cada bloque corresponde a un estado, las sentencias entre corchetes corresponden a condiciones para cambio de estado, y las sentencias entre llaves corresponde a cambio de los valores de las señales de control en la transición de estados. La máquina de estados constá de 5 estados, los cuales serán explicados a continuación:

1. **Buscar correlación:** Este estado es un estado de inicialización, en el cual se compara, en cada ciclo de reloj, los valores de entrada *Correlación* y *Piso Ruido*. Cuando *correlación* supere  $k$  veces a *Piso Ruido*, hay un cambio de estado hacia el estado **Esperar T0**. Además del cambio de estado también cambian de valor algunas señales internas, como señales de salida, como *maxCorr* que pasa a tomar el valor de *correlación* y será el valor de correlación más alto al momento. También, se inicializa un temporizador *T0Delay*, la cantidad de muestras de señal



**Figura 3.8:** Diagrama de bloques de la máquina de estados encargada de manejar las señales de control del procesador 3

*muestrasIn* se inicializa a 0, la señal *rst* se activa para resetear todos los bloques de procesamiento comandados por la máquina de estado y la señal *chkCRC* se inicializa en 0.

2. **Esperar T0:** El objetivo de este estado es el de esperar los dos  $2\mu s$  que hay entre que se detecta el máximo de correlación y el inicio del mensaje ADS-B. Lo que hace es poner un contador *T0Delay*, que según la frecuencia de reloj contará más o menos, por ejemplo para una frecuencia de reloj de  $12,5MHz$  los  $2\mu s$  corresponden a 25 ciclos de reloj. Sin embargo, también este estado estará comparando constantemente la aparición de un valor de *correlación* mayor a *maxCorr*. En el caso de que haya un *correlación* superador, éste será el nuevo valor de *maxCorr* y el valor de *T0Delay* se reiniciará nuevamente a 0. Una vez

que el contador llegue al valor equivalente a  $2\mu s$  hay un cambio de estado hacia **Procesamiento bits**.

3. **Procesar bits (PB)**: Este estado se encarga de asegurar que entren la cantidad de muestras de información del mensaje ADS-B, 88 bits. Para ello tiene un contador que, al igual que el estado anterior, deberá contar tantos ciclos de reloj con tal de tomar los 88 bits necesarios. También, la señal *rst* se pone en 0, para habilitar el procesamiento del bloque encargado de decidir si es un '0' o un '1'. Además, al igual que el estado **Esperar T0**, este estado se fija que al principio de este contador haya un valor de *correlación* superador a *maxCorr*, si lo hay (hay que elegir un umbral de cantidad de muestras a considerar), entonces, se regresa al estado **Esperar T0**. Si no pasa nada de lo mencionado anteriormente, entonces, se pasa al estado **Vaciar registro**, para ello, se activa la señal *vaciarReg* y el contador *CRC Ciclos* se inicializa en 0.
4. **Vaciar registro**: Este estado se encarga de vaciar los registros del bloque de chequeo de paridad, para poder analizar las muestras de la nueva señal. Tiene un contador *CRC Ciclos* que cuenta los ciclos de reloj de duración de los 24 bits correspondientes al código CRC de la señal ADS-B. Una vez que llega al valor de esperado, se activa una señal llamada *chkCRC* que indica que ya se ha hecho el chequeo de errores. Además, las señales *maxCorr*, *muestrasIn*, *rst*, *vaciarReg* se ponen en 0 una vez que pasa de estado. El estado al que avanza es **Borrar PB**.
5. **Borrar PB**: el objetivo de este último estado es el de limpiar los registros del bloque que se encarga de la decisión de bits. Se dejan entrar 100 muestras, o las que el usuario disponga, con tal de que las salidas de este bloque sean '0'. Una vez que se llega a la cantidad de muestras, se vuelve al estado inicial **Buscar correlación** a la espera de nuevas señales ADS-B.

Los bloques de decisión de bits y detección de errores cumplen los mismos principios que se describieron antes en este capítulo, solamente que habrá señales de control encargadas de activar o desactivar su funcionamiento.

Cabe aclarar que este bloque de procesamiento queda prototipado en *Simulink*, donde ha sido probado con éxito junto a todo el sistema de recepción. Pero, para las pruebas de desempeño del sistema de recepción que se verán en el capítulo 6, éste no será el procesador elegido. El motivo por el cual se elegirá el procesador 2 es porque es el más veloz a nivel de tiempo de procesamiento en las implementaciones en *software*. Seguramente, una vez que se haga el paso a la FPGA el procesador más rápido será éste.

### 3.3. Resumen Capítulo 3

Con la señal digitalizada y con su representación en fase y cuadratura en bande base, en este capítulo, se detalló cómo es la cadena de procesamiento necesaria para obtener cadenas de bits con mensajes ADS-B.

Entre las pasos de procesamiento, se detallaron la interpolación del *frame* de datos en el caso de que la frecuencia de muestreo seleccionada no sea entera par. Luego, se toma el módulo cuadrado del *frame* codificado en I y Q, ya que, el método de procesamiento utilizado solo contempla la amplitud de la señal ADS-B. Hecho estos pasos, se pasa a una etapa de detección. Para esta etapa, se diseñaron diferentes tipos de procesamientos; dos para ser implementados en *software* y otro para ser implementado en una FPGA (*hardware*). Esta etapa de detección contempla la verificación de presencia del preámbulo, la conversión a bits, la detección de errores y la presencia del DF adecuado.

Una vez lista la etapa de detección de señales, las cadenas de bits validadas pasan a una etapa de decodificación del mensaje. Esta etapa se verá en el capítulo 4.



# Capítulo 4

## Decodificación de señales ADS-B

*“Una computadora puede ser llamada ‘inteligente’ si logra engañar a una persona haciéndole creer que es un humano”*

— Alan Turing

Una vez que se hayan descartado y detectado señales ADS-B, se puede decodificar la señal. Como se mencionó anteriormente, los *transponders* pueden enviar diferentes tipos de mensajes ADS-B, pero solo un tipo de mensaje por señal. Para decodificar cada tipo de mensaje, se cuenta con los siguientes documentos

1. *International Civil Aviation Organization, Annex 10, Volume 4. Surveillance and Collision Avoidance Systems.* [5]
2. *Technical Provisions For Mode S Services and Extended Squitter (Doc 9871)* [6].

Estos dos artículos explican detalladamente los pasos a seguir para decodificar señales dentro del mundo de la vigilancia aérea y, en particular, para esta aplicación de interés.

Sin entrar en más detalle sobre la bibliografía utilizada, se explicará cómo está compuesta la señal y sus diferentes variantes. En la tabla 1.1, se puede ver cómo están ordenados los 112 bits de información que brinda una señal ADS-B. Se recuerda que para las respuestas de Modo S, las cuales contienen 56 bits de información, no se cuenta con los 56 bits de datos, mientras que los demás campos se mantienen.

### 4.1. Formato de bajada (DF)

El formato de bajada (*Downlink Format*, DF) consiste de 5 bits que representan un número decimal. Como el protocolo del Modo S contempla diferentes servicios y, además, cada uno de ellos tiene adjudicado un DF, se tiene que poder diferenciar uno de otro. En este caso, solo se tendrán en cuenta el DF=17 para servicios de ADS-B y DF=11 para las respuestas de Modo S.

## 4.2. Capacidad (CA)

Está compuesto por 3 bits, del 6 al 8, el código de capacidad transmitido para dar información del nivel del *transponder* que la aeronave utiliza. Por ejemplo, el CA=4 significa que el *transponder* es de nivel 2 o superior, y tiene la habilidad de mandar mensajes en tierra.

## 4.3. Dirección de aeronave ICAO

La dirección de aeronave ICAO (ICAO *aircraft address*) es un código de 24 bits, del 9 al 32. Éste tiene como objetivo dar una identificación sin ambigüedad de cada aeronave. El código es interpretado en formato hexadecimal, es decir que consta de 6 caracteres de este formato. Es indispensable la utilización de este código ya que, al ser transmitido en todos los mensajes con DF=17 o DF=11, permitirá hacer un seguimiento diferenciado por aeronave. Además, esta etiqueta es indispensable a la hora de hacer multilateración (MLAT), ya que se necesita contar con la misma información en cada receptor y una forma de corroborar eso es con la dirección ICAO. Por ejemplo, para el siguiente mensaje ADS-B llevado a formato hexadecimal:

**8D4840D6202CC371C32CE0576098**

La dirección ICAO de la aeronave que ha transmitido ese mensaje es:

Dirección ICAO: **4840D6**

## 4.4. Bloque de mensaje

Hasta el momento, los campos explicados fueron iguales para el DF=11 y DF=17. Esta sección de 56 bits es la que diferencia estos dos formatos de bajada. Este segmento exclusivo para mensajes ADS-B puede contener información de posición, de velocidad, de identificación o del estado de la aeronave emisora. La tabla 1.2 muestra los diferentes tipos de mensaje que el receptor es capaz de decodificar.

Como se puede ver, TC es el código de tipo de mensaje y consta de 5 bits al inicio del bloque de mensaje. A continuación, se pasará a detallar cómo decodificar cada uno de los diferentes tipos de mensaje posible.

### 4.4.1. Identificación de aeronave

Aunque ya se cuenta con un código que puede distinguir las aeronaves sin ambigüedad como es la dirección ICAO, las compañías aéreas, en el caso de aviones comerciales, asignan un código de vuelo a cada aeronave, ya sea para distinguir entre aerolíneas o para poder hacer un seguimiento por vuelo. Por ejemplo, un vuelo de Aerolíneas Argentinas que va desde la Ciudad de Buenos Aires hacia San Carlos de Bariloche lleva el código AR1694, mientras que el mismo avión en el viaje de vuelta cambia de identificación a AR1695. Este código permite distinguir diferentes vuelos, ya que probablemente el receptor reciba a lo largo de un período largo de tiempo muchos mensajes con una misma dirección ICAO, pero con diferentes trayectorias.

El bloque de mensaje consta además del TC, que va entre 1 y 4, que distingue la categoría de la aeronave. Según la categoría, el mensaje sigue con 3 bits que indican según la normativa diferentes cualidades del avión, como el peso (liviano, mediano o pesado) o servicio que brinda la aeronave (comercial, emergencia, avión de servicio, etc). Seguido de estos 8 bits que categorizan la aeronave, vienen 48 bits que se dividen en 8 bloques de 6 bits cada uno. Cada bloque contiene la representación de un carácter de la identificación de la aeronave, tal como explica el reglamento de la ICAO. Las letras de la A a la Z corresponden a los números entre 1-26, los números del 1 al 9 se mapean con códigos que forman los números entre 48 y 57, y el signo \_ corresponde al número 32. Se toma el siguiente ejemplo:

Mensaje Recibido: **8D4840D6202CC371C32CE0576098**

Bloque de mensaje: **202CC371C32CE0**

Binario	001011	001100	001101	110001	110000	110010	110011	100000
Decimal	48	50	51	32	11	12	13	49
Código	K	L	M	1	0	2	3	-

**Tabla 4.1:** Ejemplo mensaje de identificación aeronave.

Identificación Aeronave: **KLM1023\_**

### 4.4.2. Mensaje de posicionamiento

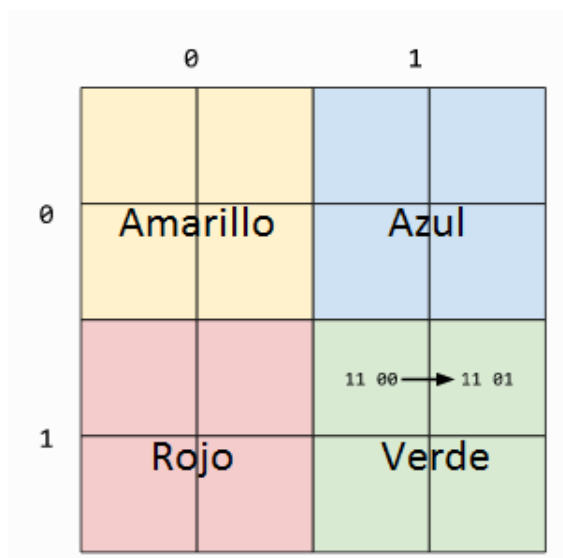
La información de posición en ADS-B está codificada usando un formato llamado Reporte de Posición Compacta (*Compact Position Reporting*, CPR). La idea principal de CPR es codificar más decimales usando menos cantidad de bits.

Un ejemplo fácil para entender CPR es el siguiente:

Imagínese que el mundo está construido por 16 zonas, las cuales se dividen en 2 niveles, cada nivel estará codificado utilizando 2 bits. Los niveles altos en color son 00 (amarillo), 01 (azul), 10 (rojo), 11 (verde), tal como muestra la figura 4.1. Dentro de

las zonas de color, los niveles bajos también están codificados similarmente.

Entonces cada zona puede ser representada por cuatro dígitos desde el 0000 al 1111. Ahora, se quiere describir el movimiento indicado por las flechas en la zona verde 1100 → 1101, pero solo se tienen 3 bits para codificar cada posición.



**Figura 4.1:** Ejemplo de codificación del formato CPR, utilizando dos mensajes de dos bits.

Es fácil de ver que los dos bits más altos aparecen en todas las posiciones, entonces, se puede definir una estructura que haga lo siguiente:

1. Los dos últimos bits representarán la posición local.
2. La combinación de los primeros dígitos de los dos mensajes definen la zona principal.

Los dos mensajes pueden ser enviados como 1 00 → 1 01. Entonces, se sabe por los dos primeros bits de cada mensaje que se está en la zona verde 11. Luego, dentro de esa zona, se puede notar que hay un movimiento de la primer cuadrícula hacia la derecha.

### CPR y sus funciones

El algoritmo de CPR es obviamente más complicado, pero su principio es muy similar al del ejemplo anterior. Si solo un mensaje es recibido, es posible encontrar múltiples soluciones ubicadas alrededor del mundo. La combinación de dos mensajes (de diferente tipo) logrará el resultado final.

Antes de ver la aplicación del algoritmo de CPR para decodificar mensajes de posición, se hará una lista de algunos parámetros y funciones matemáticas comúnmente usadas para la decodificación de este proceso.

### Número de zonas (NZ):

Número de zonas de latitud geográfica entre el ecuador y un polo. NZ es igual a 15 para la codificación CPR del Modo S.

### floor(x):

La función  $floor(x)$  define el valor de un número  $x$  a su entero menor más cercano.

Por ejemplo:

$$floor(3,7) = 3$$

$$floor(-10,2) = -11$$

### mod(x,y):

La función módulo retorna:

$$mod(x,y) = x - y \cdot floor(\frac{x}{y}) \quad (4.1)$$

donde  $y$  no puede ser cero.

### Número de zonas de longitud geográfica, NL(lat):

El número de zonas de longitud esta dado por el ángulo de latitud,  $lat$ . Los valores enteros donde se puede encontrar este valor están entre 0 y 59. Se calcula de la siguiente forma:

$$NL(lat) = floor(\frac{2\pi}{arccos(1 - \frac{1 - \cos(\frac{\pi}{2NZ})}{\cos^2(\frac{\pi}{180}lat)})}) \quad (4.2)$$

Para latitudes cercanas al ecuador o a los polos, se retornan los siguientes valores:

1.  $lat=0 \rightarrow NL=59$
2.  $lat=87 \rightarrow NL=2$
3.  $lat=-87 \rightarrow NL=2$
4.  $lat>87 \rightarrow NL=1$
5.  $lat<-87 \rightarrow NL=1$

### Posición en el aire

Una vez definidos los conceptos importantes, se decodifican los mensajes de posición en el aire de ADS-B.

Los mensajes de posición en el aire tienen valores de TC entre 9 y 18, y entre 20 y 22. Los mensajes están compuestos de la siguiente forma:

# Bits	Bits	Abreviación	Nombre
5	33-37	TC	Código de tipo de mensaje
2	38-39	SS	Estado de vigilancia
1	40	NICsb	NIC suplemento-b
12	41-52	ALT	Altitud
1	53	T	Sincronismo de tiempo
1	54	F	CPR par/impar <i>flag</i>
17	55-71	LAT-CPR	Latitud en formato CPR
17	72-88	LON-CPR	Longitud en formato CPR

**Tabla 4.2:** Campos que comprenden un mensaje de posición aérea de una aeronave con capacidad ADS-B.

### Cálculo de altitud:

Como se ve en la tabla 4.2, la altitud está codificada en 12 bits. La forma de compactar la información de altura es la siguiente

1. Se debe ver el valor del bit 48, es decir, el octavo de la cadena de doce. A este valor se lo llamará Q-bit. El valor de Q-bit indica si la altitud fue codificada en múltiplos de 25 o 100 *ft*, donde ‘0’ indica 100 *ft* y ‘1’ indica codificación con múltiplos de 25 *ft*.
2. Se quita el Q-bit de la cadena de doce y se calcula el valor N en decimal de los restantes 11 bits.
3. El valor de la altitud estará dado por el valor N multiplicado por el múltiplo hallado gracias al Q-bit y a ese resultado se le restan 1000 *ft*.

A continuación, se muestra un ejemplo para clarificar esta explicación

Cadena de altitud: 1100001**1**1000

El Q-bit, resaltado en negrita, está en ‘1’, por lo tanto, se sabe que la altitud fue codificada en múltiplos de 25 *ft*.

Se quita el Q-bit de la cadena de altitud, por lo que queda:

1. Binario: **11000011000**
2. Decimal: **1560**

Ahora, se aplica la fórmula para obtener la altitud final:

$$Altitud = 1560 * 25ft - 1000ft = 38000ft = 11582m$$

### Cálculo de posición geográfica con dos mensajes:

Para hallar la latitud y longitud, primero, se espera que lleguen dos mensajes de posición ADS-B de diferente tipo, uno par y otro impar. Para ver la paridad del mensaje, se debe ver el bit 54, si es '0' es una mensaje par, e impar para el caso opuesto. Cabe aclarar que la diferencia temporal en la que se recibieron estos dos mensajes debe ser menor a 10s, según indica el Anexo 10 de la ICAO.

Una vez obtenidos estos dos mensajes, se pasan a formato decimal las latitudes y longitudes CPR. Luego, estos valores se dividen por  $2^{17}$ , ya que las cadenas fueron codificadas en 17 bits. De esta forma, se obtienen valores normalizados entre 0 y 1.

Una vez que se obtienen los valores normalizados de latitud y longitud, se calcula el índice de latitud. Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$j = \text{floor}(59 \cdot \text{lat}_{cprPar} - 60 \cdot \text{lat}_{cprImpar} + \frac{1}{2}) \quad (4.3)$$

Se definen dos constantes:

1.  $dLat_{par} = \frac{360}{60}$
2.  $dLat_{impar} = \frac{360}{59}$

Se usan las siguientes ecuaciones para definir las latitudes relativas:

$$\text{lat}_{par} = dLat_{par} \cdot (\text{mod}(j, 60) + \text{lat}_{cprPar}) \quad (4.4)$$

$$\text{lat}_{impar} = dLat_{impar} \cdot (\text{mod}(j, 60) + \text{lat}_{cprImpar}) \quad (4.5)$$

Para asegurar que los valores de latitud se encuentren entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , a los valores mayores a  $270^\circ$ , correspondientes al hemisferio sur, se les resta  $360^\circ$ . De esta forma, los resultados seguirán los estándares.

Además, una vez computadas las latitudes relativas  $\text{lat}_{par}$  y  $\text{lat}_{impar}$ , hay que asegurarse de que  $NL(\text{lat}_{par})$  coincida con  $NL(\text{lat}_{impar})$ . Si esto no ocurre, los dos mensajes se enviaron de diferentes zonas de latitud, por lo que es imposible calcular la posición. En este caso, se deben descartar estos dos mensajes y esperar por nuevos.

La latitud final será la correspondiente al último tipo de mensaje que arribó. Es decir, si de los dos mensajes el más reciente es el de tipo par, entonces  $\text{lat} = \text{lat}_{par}$ . En el caso opuesto  $\text{lat} = \text{lat}_{impar}$ .

Habiendo calculado la latitud, se calcula la longitud. En el caso de que el mensaje par haya llegado último, el procedimiento para el cálculo de longitud es el siguiente

$$ni = \max(NL(lat_{par}), 1) \quad (4.6)$$

$$dLon = \frac{360}{ni} \quad (4.7)$$

$$m = \text{floor}(lon_{cprPar} \cdot [NL(lat_{par}) - 1] - lon_{cprImpar} \cdot [NL(lat_{par}) - 1] + \frac{1}{2}) \quad (4.8)$$

$$lon = dLon \cdot (\text{mod}(m, ni) + lon_{cprPar}), \quad (4.9)$$

y en el caso de que el mensaje de tipo impar haya llega último

$$ni = \max(NL(lat_{impar}), 1) \quad (4.10)$$

$$dLon = \frac{360}{ni} \quad (4.11)$$

$$m = \text{floor}(lon_{cprPar} \cdot [NL(lat_{impar}) - 1] - lon_{cprImpar} \cdot [NL(lat_{impar}) - 1] + \frac{1}{2}) \quad (4.12)$$

$$lon = dLon \cdot (\text{mod}(m, ni) + lon_{cprImpar}). \quad (4.13)$$

Si el resultado es mayor a  $180^\circ$ , del meridiano de Greenwich hacia el oeste se resta  $360^\circ$ .

A continuación, se muestra un ejemplo del procedimiento.

Mensajes Recibidos:

	ICAO24	DATOS	CRC
8D	40621D	58C382D690C8AC	2863A7
8D	40621D	58C386435CC412	692AD6

**Tabla 4.3:** Ejemplo mensaje de posicionamiento de aeronave.

Los bloques de datos se expresan en binario.

TC	SS	NICsb	ALT	T	F	CPR-LAT	CPR-LON
01011	00	0	110000111000	0	0	10110101101001000	01100100010101100
01011	00	0	110000111000	0	1	10010000110101110	01100010000010010

**Tabla 4.4:** Ejemplo bloque de datos del mensaje de posicionamiento de aeronave en binario.

Se ve que de los dos mensajes recibidos, el primero tiene el bit F en '0', por lo que es un mensaje par, mientras que el segundo mensaje tiene el bit F en '1', siendo así un mensaje impar.

Se calculan las cadenas de latitud y longitud en formato cpr a formato decimal. Y, luego, se normaliza dividiendo por  $2^{17}$ .

1. CPR-LAT-PAR:  $10110101101001000 \rightarrow 93000 \rightarrow 93000 / 131072 \rightarrow 0.7095$



2. CPR-LON-PAR:  $01100100010101100 \rightarrow 51372 \rightarrow 51372/131072 \rightarrow 0.3919$
3. CPR-LAT-IMPAR:  $10010000110101110 \rightarrow 74158 \rightarrow 74158/131072 \rightarrow 0.5658$
4. CPR-LON-IMPAR:  $01100010000010010 \rightarrow 50194 \rightarrow 50194/131072 \rightarrow 0.3829$

Se calcula el índice de latitud usando la ecuación 4.3, el cual da un valor de  $j = 8$ .

Se calcula la latitud para cada tipo de mensaje utilizando ese índice y los valores CPR de latitud y se obtiene lo siguiente:

1.  $lat_{par} = 52,25720214843750^\circ$
2.  $Lat_{impar} = 52,26578017412606^\circ$

Se supone que el mensaje de tipo par es el que llegó último y, considerando que los dos mensajes se encuentran dentro de la misma zona de latitud, entonces la latitud es  $lat = lat_{par}$ .

Habiendo calculado la latitud, se aplica el procedimiento para encontrar la longitud, sabiendo que el último mensaje fue par.

$$lon = 3,91937^\circ.$$

Por lo que la aeronave se encuentra en la posición

1.  $lat = 52,25720214843750^\circ$
2.  $lon = 3,91937^\circ$

### Cálculo de posición geográfica con un mensaje de posición:

Este método permite calcular la posición de la aeronave utilizando solo un mensaje y una posición de referencia. La posición de referencia debe estar cerca de la posición actual de la aeronave. Esta posición puede ser bien una posición computada anteriormente, o la posición de la antena ADS-B, la cual debe estar en un rango menor a las 180 millas náuticas.

Primero, se debe calcular el índice de latitud utilizando la siguiente ecuación:

$$j = \text{floor}\left(\frac{lat_{ref}}{dLat}\right) + \text{floor}\left(\frac{\text{mod}(lat_{ref}, dLat)}{dLat} - lat_{cpr} + \frac{1}{2}\right), \quad (4.14)$$

donde  $lat_{ref}$  es la latitud de la posición de referencia, y el  $dLat$  utilizado dependerá de si el mensaje es par o impar, y el mismo valor que se definió en el caso anterior.

La latitud se calcula de manera sencilla,

$$lat = dLat \cdot (j + lat_{cpr}), \quad (4.15)$$

mientras que para la longitud primero se calcula el índice de longitud correspondiente,

$$m = \text{floor}\left(\frac{\text{lon}_{ref}}{dLon}\right) + \text{floor}\left(\frac{\text{mod}(\text{lon}_{ref}, dLon)}{dLon} - \text{lon}_{cpr} + \frac{1}{2}\right), \quad (4.16)$$

donde  $\text{lon}_{ref}$  es la longitud de la posición de referencia, y el  $dLon$  se calcula como,

$$dLon = \begin{cases} \frac{360}{NL(lat)} & \text{si } NL(lat) > 0 \\ 360 & \text{si } NL(lat) = 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

Finalmente, la longitud se computa de la siguiente manera,

$$\text{lon} = dLon.(m + \text{lon}_{cpr}). \quad (4.18)$$

### Posición en superficie

Los TC con valores entre 5 y 8 corresponden a mensajes de posición de la aeronave en superficie. Estos mensajes son muy útiles para hacer seguimiento desde la torre de control del aeropuerto de los aviones en la pista, también para hacer seguimiento de otro tipo de vehículos que lleven un *transponder* ADS-B.

Los distintos campos de los mensajes de posición en superficie se enumeran en la siguiente tabla:

#	Bits	Abreviación	Nombre
5	33-37	TC	Código de tipo de mensaje
7	38-44	MOV	Movimiento
1	45	GTS	Estado de seguimiento en pista
7	46-52	GT	Ángulo en tierra
1	53	T	Sincronismo de tiempo
1	54	F	CPR par/impar <i>flag</i>
17	55-71	LAT-CPR	Latitud en formato CPR
17	72-88	LON-CPR	Longitud en formato CPR

**Tabla 4.5:** Campos que comprenden un mensaje de posición en superficie de una aeronave con capacidad ADS-B.

Este tipo de mensaje difiere muy poco de los mensajes de posición del avión en el aire, únicamente en los primeros campos.

#### 1-Movimiento:

El campo de movimiento indica la velocidad del avión en tierra. Consiste de 7 bits, donde su representación en binario indica una velocidad la cual se detallará en la [tabla 4.6](#).

Codificación	Velocidades [km/h]	pasos
0	Sin información	
1	vel<0.2315	
2-8	0.2315<vel<1.852	0.2315 km/h por paso
9-12	1.852<vel<3.704	0.463 km/h por paso
13-38	3.704<vel<27.78	0.926 km/h por paso
39-93	27.78<vel<129.64	1.852 km/h por paso
94-108	129.64<vel<185.2	3.704 km/h por paso
109-123	185.2<vel<324.1	9.26 km/h por paso
124	vel>324.1	
125-128	reservados	

**Tabla 4.6:** Velocidades posibles en un mensaje de posición en superficie ADS-B.

### 2-Angulo en tierra (GT):

Si el *flag* de seguimiento en pista se encuentra en '1', se puede calcular el ángulo de apuntamiento del avión en tierra. Este campo consiste en un bloque de 7 bits, entonces, se puede representar representar  $2^7 = 128$  de graduación angular. El cero indica el apuntamiento al norte, mientras que el ángulo a computar se obtiene como,

$$Angulo_{tierra} = Decimal(GT) \cdot \frac{360}{128}. \quad (4.19)$$

### 4.4.3. Mensajes de velocidad

El TC=19 es el código utilizado para decodificar mensajes de velocidad. Hay dos subtipos principales dentro de este tipo de mensajes. El subtipo 1, para velocidades con respecto a la superficie, y el subtipo 3, para velocidades en el aire. Los otros dos subtipos, el 2 y el 4, se utilizan para aviones supersónicos, que no se detallan en este trabajo.

#### Subtipo 1

Este subtipo es transmitido cuando la velocidad con respecto a la superficie está disponible. El mensaje contiene información de velocidad y de apuntamiento. La velocidad y apuntamiento se descomponen en su componente Norte-Sur y Este-Oeste.

Para decodificar la velocidad horizontal, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Primero, computar en formato decimal los valores de  $V_{ew}$  y  $V_{ns}$  y, luego, invertir la dirección según la siguiente fórmula:

$$V_{we} = \begin{cases} 1(V_{ew} - 1) & si \ S_{ew} = 1 \\ V_{ew} - 1 & si \ S_{ew} = 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

# Bits	Bits	Abreviación	Nombre
5	33-37	TC	Código de tipo de mensaje
3	38-40	ST	subtipo
1	41	IC	Bandera de intención de cambio
1	42	RESV A	Reservado A
3	43-45	NAC	Incerteza de velocidad
1	46	Sew	Signo velocidad este-oeste
10	47-56	Vew	Velocidad este-oeste
1	57	Sns	Signo velocidad norte-sur
10	58-67	Vns	Velocidad norte-sur
1	68	VrSrc	Fuente de velocidad vertical
1	69	Svr	Signo velocidad vertical
9	70-78	Vr	Velocidad vertical

**Tabla 4.7:** Campos que comprenden un mensaje de velocidad subtipo 1 ADS-B.

$$V_{sn} = \begin{cases} 1(V_{ns} - 1) & \text{si } S_{ns} = 1 \\ V_{ns} - 1 & \text{si } S_{ns} = 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

2. Una vez hecho esto, se calcular la velocidad como valor absoluto de estos dos últimos valores. Y el apuntamiento como el arco-tangente de dos argumentos de esas magnitudes.

$$v = \sqrt{v_{sn}^2 + v_{we}^2} \quad (4.22)$$

$$h = \text{atan2}(v_{we}, v_{sn}) \cdot \frac{360}{2\pi} \quad (4.23)$$

3. Si el apuntamiento da un resultado menor a cero grados, se debe sumar  $360^\circ$  a ese valor. Nuevamente, el valor cero corresponde a la dirección norte de la tierra. La velocidad está en unidades de nudos, kts.

La velocidad vertical se computa viendo los bits 70 al 78. Donde Svr indica si el avión está subiendo '0' o bajando '1'. Los 9 bits se pasan a formato decimal, se les resta uno y a ese valor se lo multiplica por 64, que es el valor de la velocidad en el eje vertical en *ft/min*.

A continuación, se presenta un ejemplo

<b>Mensaje Recibido</b>	8D485020994409940838175B284F
<b>Bloque de datos</b>	99440994083817
<b>Datos en binario</b>	100110010100010000000100110010100000010000011100000010111

#### Velocidad Horizontal:

$V_{ew} = 0000001001 \rightarrow 9$ .

$S_{ew} = 1$ .

$V_{ns} = 0010100000 \rightarrow 160$ .

$$S_{ns} = 1.$$

Entonces:

$$V_{we} = -1.(V_{ew} - 1) = -8.$$

$$V_{sn} = -1.(V_{ns} - 1) = -159.$$

$$v = 159,2kts = 294,83km/h.$$

$$h = 182,88^\circ$$

### Velocidad Vertical:

$$Vr = 000001110 \rightarrow 14$$

$$Svr : 1 \rightarrow \text{descendiendo}$$

$$Vz = (14 - 1),64 = 832ft/min = 4m/s.$$

### Subtipo 3

Este tipo de mensaje se transmite cuando el subtipo 1 no está disponible. En casos reales, solo el 0.3% de los mensajes de velocidad pertenecen a este subtipo. No difiere mucho del caso anterior, solo en algunos campos.

# Bits	Bits	Abreviación	Nombre
5	33-37	TC	Código de tipo de mensaje
3	38-40	ST	subtipo
1	41	IC	Bandera de intención de cambio
1	42	RESV A	Reservado A
3	43-45	NAC	Incerteza de velocidad
1	46	Shdg	Signo apuntamiento
10	47-56	Hdg	Apuntamiento
1	57	AS-t	Tipo de velocidad aérea
10	58-67	AS	Velocidad aérea
1	68	VrSrc	Fuente de velocidad vertical
1	69	Svr	Signo velocidad vertical
9	70-78	Vr	Velocidad vertical
2	78-80	RESV B	Reservado B
1	81	Sdif	Signo de diferencia altitud barométrica
7	82-88	Dif	Diferencia altitud barométrica

**Tabla 4.8:** Campos que comprenden un mensaje de velocidad subtipo 3 ADS-B.

Solo los campos del bit 46 al 67 cambian respecto al subtipo 1. Estos campos corresponden a la velocidad horizontal y la forma de codificación utilizada es diferente.

El bit 46 correspondiente al estado de apuntamiento Shdg indica si la información de apuntamiento está disponible. Es un '1' cuando se encuentra esa información. Una vez que se sabe la disponibilidad del apuntamiento, se calcula con la siguiente ecuación,

$$Apuntamiento = Decimal(Hdg) \cdot \frac{360}{1024}. \quad (4.24)$$

Para calcular el módulo de la velocidad, se deben ver los bits 47 al 56, donde el valor corresponde al formato decimal del bloque binario. El valor de esta velocidad se informa en nudos.

Luego, los demás campos se computan igual que en el subtipo 1.

#### 4.4.4. Estado de la aeronave

Si el avión se encuentra en estado de emergencia o necesita algún tipo de prioridad, lo informará en el TC=28. Este mensaje es sencillo y solo contiene seis mensajes de alerta informados en los bits 9 al 11 del bloque de datos del mensaje ADS-B. Los posibles mensajes de alerta son:

0	Sin emergencia
1	Emergencia general
2	Emergencia médica
3	Mínimo de combustible
4	Sin comunicación
5	Interferencia ilegal
6	Reservado
7	Reservado

**Tabla 4.9:** Campos que comprenden un mensaje de estado de emergencia de aeronave ADS-B.

#### 4.4.5. NIC/NAC

NIC, NAC, NUC y SIL son medidas de integridad, precisión o incertezas de la medición de posición de la unidad de GPS.

1. NIC - Navigation Integrity Category.
2. NUC - Navigation Uncertainty Category.
3. NAC - Navigation Accuracy Category.
4. SIL - Surveillance/Source Integrity Level.

A los fines de este trabajo, solo son importantes los valores NIC y NAC, ya que son los que se pueden conseguir en mensajes del tipo ADS-B. El NAC viene informado en los mensajes de velocidad y representa la precisión de la posición y la velocidad. Utilizando el artículo de Provisiones para servicios de Modo S, se puede encontrar la interpretación de este campo.

En el caso del NIC, se debe tener en cuenta el TC y el SBnic de los mensajes de posición para poder computar el NIC y el radio de contención horizontal,  $R_c$ . En la siguiente tabla, se ven los diferentes casos según los valores de TC y SBnic.

TC	SBnic	NIC	$R_c$
9	0	11	<7.5m
10	0	10	<25m
11	1	9	<74m
	0	8	<185m
12	0	7	<370m
13	1*	6	<556m
	0		<925m
	1**		<1111m
14	0	5	<1852m
15	0	4	<3704m
16	3	1	<7408m
	0	2	<14.8km
17	0	1	<37km
18	0	0	>37km

**Tabla 4.10:** Valores de incertidumbre en la posición para cada valor de NIC. \*Suplemento-A NIC = 0, \*\* Suplemento-A NIC = 1

## 4.5. Resumen Capítulo 4

Se detallaron los diferentes tipos de mensaje que se pueden encontrar en ADS-B. Cada mensaje contiene un código único de *transponder* llamado dirección ICAO. También, se encontró en algunos mensajes el código de vuelo, asignado por lo general por las diferentes aerolíneas.

Se decodificaron los mensajes de posición que utilizan un método de compresión llamado CRC que permite poner una gran cantidad de decimales en unos pocos bits, utilizando dos mensajes para su decodificación. Se observó que es posible decodificar los mensajes de posición con un solo mensaje y utilizando una posición cercana de referencia.

Además de la posición y número de vuelo, los mensajes ADS-B pueden contener información de velocidad. Se han descrito los dos subtipos de mensajes de velocidad más importantes para el desarrollo del receptor ADS-B. Los *transponders* envían periódicamente mensajes de estado del avión, los cuales se pueden distinguir entre 5 emergencias diferentes.

Finalmente, se introdujeron parámetros informados dentro de los mensajes de posición y de velocidad que indican la integridad y precisión de la posición o velocidad reportada por el GPS.

Dado que se han decodificado los mensajes de ADS-B, se desarrollarán aplicaciones que interactúen con el usuario. Aplicaciones como mapas, que muestran los aviones en la zona de cobertura del receptor, bases de datos que puedan guardar datos de las trayectorias realizadas por aviones, llevar los datos a formato ASTERIX para informar los datos en un protocolo estandarizado para utilizar en las ATC, entre muchas otras aplicaciones posibles.



# Capítulo 5

## Aplicaciones destinadas al usuario

*“Le haré una oferta que no podrá rechazar”*

— Vito Corleone

En los capítulos anteriores, se habló de cómo detectar señales ADS-B y de cómo decodificarlas. Una vez hechos los pasos anteriores, se pueden hacer infinidad de aplicaciones para diferentes tipos de usuarios. Entre las aplicaciones que se trabajó, se pueden mencionar las siguientes:

1. Bases de datos capaces de llevar un registro histórico de cada aeronave que sobrevoló la zona de cobertura del radar.
2. Sistemas de seguimiento de aeronaves.
3. Servidores dedicados a tomar datos ADS-B de todo el mundo.
4. Utilizar el estándar ASTERIX para establecer comunicación con las ATC.

En este capítulo, se hará una descripción de todas las aplicaciones destinadas al usuario desarrolladas en este proyecto integrador.

### 5.1. Base de datos ADS-B

Con la información que están emitiendo constantemente las diferentes aeronaves, el sistema que se ha desarrollado en este trabajo es capaz de hacer un registro de los parámetros más importantes del vuelo. Este registro consta de diferentes campos, entre ellos, se pueden encontrar

1. Hora último mensaje recibido.
2. ICAO aircraft address.

3. Numero de vuelo.
4. Latitud
5. Longitud.
6. Altitud.
7. Velocidad Horizontal.
8. Dirección Horizontal.
9. Velocidad vertical.
10. Estado del vuelo.

Toda estos campos que utiliza la base de datos, se actualizan a medida que se reciben los mensajes pertinentes para cada campo. Por ejemplo, si el primer mensaje que llega es un mensaje de velocidad, entonces, la base de datos tendrá completos los campos 1, 2, 7, 8, 9 únicamente.

La forma que el sistema utiliza para distinguir entre aeronaves es la *ICAO aircraft address*, la cual como se ha explicado anteriormente, es enviada en todos los tipos de mensaje ADS-B. Entonces, cada vez que se recibe un mensaje de ADS-B o respuesta de Modo S, el sistema identifica la dirección de la aeronave, y modifica el nodo de la base de datos correspondiente a esa dirección.

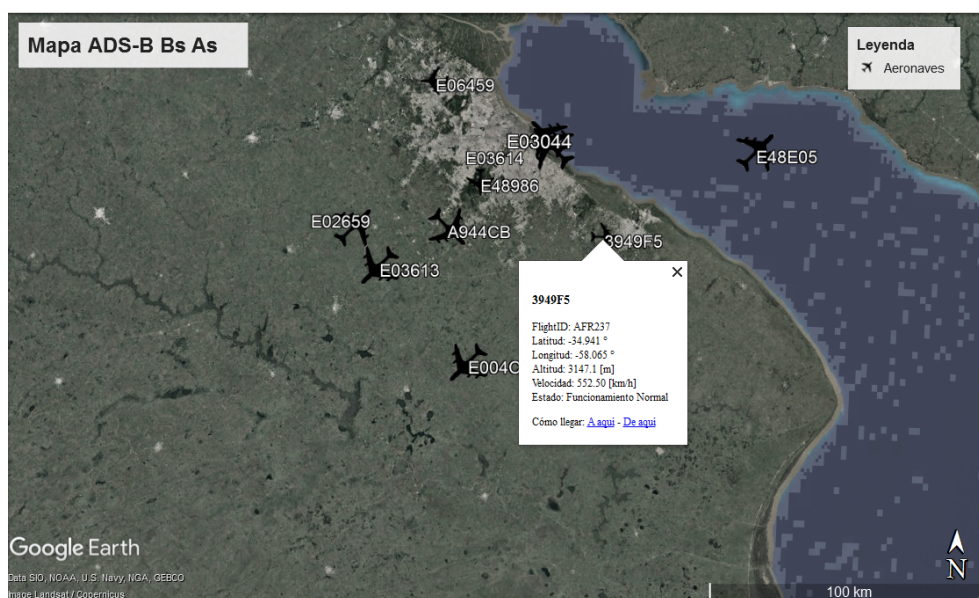
Antes de que el sistema de recepción se inicialice, el usuario tiene la opción de decirle al programa que guarde todos los datos en un archivo de tipo *Comma-Separated Values* (*csv*). En este archivo, se guardan los mensajes recibidos en cada momento, donde cada fila es un mensaje nuevo y cada columna son los campos del nodo correspondiente de la bases de datos. Esta opción es muy útil para hacer procesamiento *offline* y para el *debug* de los algoritmos desarrollados. Procesamientos como ver todas las trayectorias realizadas por una aeronave, medir la zona de cobertura del radar, etc.

## 5.2. Visualización de aeronaves

El programa fue diseñado para que pueda mostrar en un mapa las aeronaves detectadas en tiempo real. Además, gracias al archivo *csv*, se pueden reconstruir las trayectorias de cada aeronave y exponerlas en un mapa. Para la visualización de los aviones, se utilizó el programa *Google Earth Pro*, la cual mediante la creación de archivos del tipo *Keyhole Markup Language* (*kml*) creados por el programa de recepción, puede mostrar todos los aviones detectados en esta aplicación.

### Visualización en tiempo real

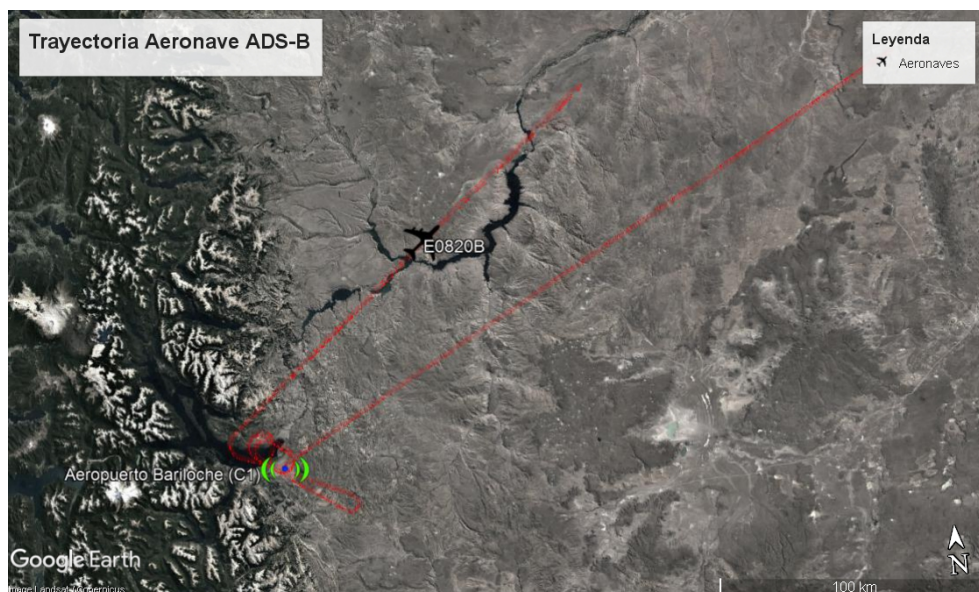
Cada vez que el receptor detecte una aeronave, el programa tiene que discriminar si se detectó un mensaje de posición. En el caso de que se haya decodificado una nueva posición, se actualiza un archivo *kml* donde se encuentran todas las aeronaves que el receptor ADS-B está detectando dentro de su zona de cobertura. El archivo *kml* tiene información de las coordenadas actuales de cada avión, como además parámetros de importancia de cada vuelo, como número de vuelo, *ICAO aircraft address*, velocidad, estado de emergencia, etc. En la figura 5.1, se muestra una captura de pantalla de la cobertura en tiempo real del receptor ADS-B en la Ciudad de Buenos Aires.



**Figura 5.1:** Captura de mapa de cobertura en tiempo real en la Ciudad de Buenos Aires.

### Visualización de trayectorias

Utilizando el archivo *csv*, donde se guardan todos los mensajes de cada aeronave con una etiqueta de tiempo, el programa puede armar las trayectorias del avión que se le indique. La generación de estas trayectorias se hace *offline*, es decir, se debe esperar a que el programa de recepción esté apagado. En la figura 5.2, se ve la trayectoria de la aeronave de la empresa ANDES Líneas Aéreas, con *ICAO aircraft address* E0820B, el cuál va de Buenos Aires a Bariloche con el número de vuelo OY860, luego hace una parada de una hora en el aeropuerto de Bariloche y, finalmente, parte hacia Buenos Aires con el numero de vuelo OY861.



**Figura 5.2:** Trayectoria de un avión de la empresa ANDES con destinos Bariloche y Buenos Aires.

### 5.3. Sistema cliente-servidor ADS-B

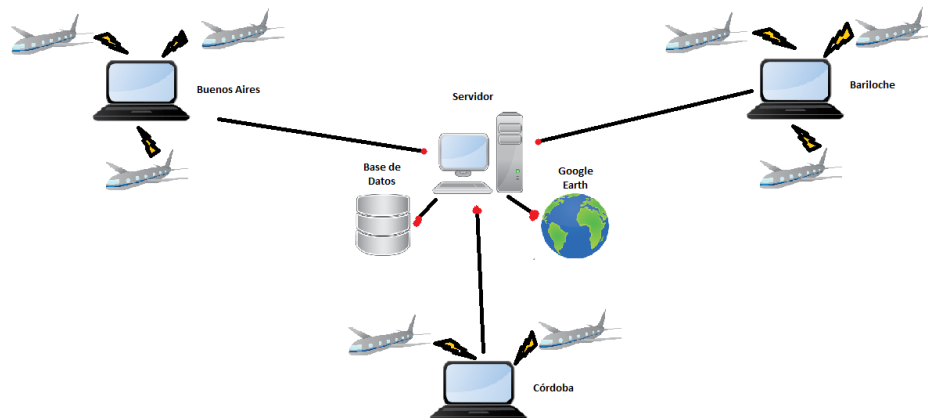
Como se verá en el capítulo 6, la cobertura de un receptor está limitada por línea de vista. Suponiendo que la máxima altura alcanzada por una aeronave comercial es de  $15,000m$ , entonces, se alcanzará una cobertura máxima de unos  $400km$  [3][5].

Al tener una cobertura limitada, una buena medida para agrandar la cobertura es poner muchos receptores ADS-B en zonas estratégicas, con el objetivo de alcanzar un alcance mayor. Por ejemplo, empresas como *FlightRadar24*, *PlineFinder*, *FlightAware*, entre otras [17][18][19], seleccionan diferentes zonas para cubrir con estos sistemas de vigilancia. Luego, cada receptor envía los datos de los aviones detectados en su área a un servidor central. Éste se encarga de mostrar en un mapa los aviones detectados en todas las zonas en tiempo real.

Siguiendo la idea de estas empresas mencionadas y como trabajo de una asignatura de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, se desarrolló un sistema cliente-servidor capaz de enviar datos de cada receptor (cliente) a un servidor central. Estos datos son enviados sobre el protocolo de control de transmisión (*Transmission Control Protocol*, TCP) y se pueden enviar datos ADS-B como comandos. En la figura 5.3, se puede ver un esquema básico del funcionamiento de este sistema cliente-servidor.

El servidor es *multithreading*, es decir, es capaz de atender muchos clientes al mismo tiempo. Esto es necesario ya que la tasa de nuevos mensajes de ADS-B es de  $0,2s$ . Si el servidor atendiera un cliente a la vez se perderían muchos datos a medida que la cantidad de clientes crezca.

Además, se creó un protocolo propio para que los clientes y servidores se entiendan. Es decir, que ambos sistemas interpreten los mensajes de la misma forma. Para ello, se



**Figura 5.3:** Esquema básico del funcionamiento del sistema cliente-servidor para ADS-B.

armaron diferentes estructuras con un código único para diferenciarlas. Cada estructura tiene distintos contenidos, como posición, velocidad, comando de borrar una aeronave, etc.

A continuación, se detallará el funcionamiento del sistema del lado del cliente y del lado del servidor.

### 5.3.1. Cliente en modo ADS-B

El cliente en modo ADS-B solo envía mensajes relacionados con los datos capturados por el receptor. Para ello, se conecta al cliente a la IP del servidor (127.0.0.0 para las pruebas) y al puerto del servidor capaz de atender el modo ADS-B, el puerto 100 en este caso.

Los tipos de mensaje que puede enviar son:

1. Posición en el aire
2. Posición en superficie
3. Velocidad
4. Numero de vuelo
5. Estado de la aeronave
6. Mensaje corto

\*Todos los mensajes se identifican con la *ICAO aircraft address*.

### 5.3.2. Cliente en modo comandos

Además de poder enviar datos de los mensajes ADS-B capturados, el sistema desarrollado puede enviar diferentes comandos al servidor. Para poder enviar comandos, el cliente deberá ser administrador del servidor. La conexión se realiza en la misma IP que el otro modo, pero el servidor la atenderá en el puerto 200.

Los tipos de comandos que se pueden enviar hacia el servidor son:

1. Abrir y cerrar mapa.
2. Modificar tiempo actualización del mapa.
3. Restringir visualización de una aeronave.
4. Eliminar aeronave de la base de datos.
5. Obtener datos de un aeronave.
6. Elegir que información mostrar en el mapa.
7. Visualizar solo una aeronave seleccionada.

### 5.3.3. Servidor en modo ADS-B

Al igual que el cliente, el servidor funciona en modo ADS-B y en modo Comandos. En este caso, el servidor en modo ADS-B estará atendiendo todas las conexiones que se realicen en el puerto 100. La tarea principal del servidor, cuando está corriendo en este modo, es actualizar constantemente una base de datos dedicada a guardar todos los datos que llegan de los diferentes receptores. Esta base de datos es similar a la descrita en [5.1](#), solo que podrá alcanzar un tamaño mucho mayor debido al alcance global del sistema.

Las funciones del servidor en modo ADS-B son:

1. Abrir una conexión con un nuevo cliente.
2. Verificar que el sea usuario habilitado.
3. Leer paquetes y verificar que sean del tipo ADS-B según el protocolo creado.
4. Confirmar Recepción al cliente.
5. Identificar el tipo de Mensaje y enviarlo a la base de datos.

#### 5.3.4. Servidor en modo comandos

El servidor en este modo atenderá las conexiones de todos los administradores en el puerto 200. La función de este hilo de procesamiento es actualizar una base de datos de comandos registrados y enviar datos solicitados al administrador.

Las funciones del servidor en modo comandos son:

1. Abrir una conexión con un administrador.
2. Verificar que éste sea administrador.
3. Leer paquetes y verificar que sean del tipo comandos según el protocolo.
4. Confirmar recepción al cliente.
5. Separar comandos de actualización con comandos de pedido de datos.
6. Si el comando es de pedido de dato, buscarlo en la base de datos de mensajes ADS-B y enviarlo al administrador.
7. Si es otro tipo de comandos, actualizar la base de datos de comandos actuales.

#### 5.3.5. Servidor en modo actualización de mapa

Este hilo de procesamiento se corre todo el tiempo, sin necesidad de que haya algún cliente conectado al servidor. La función de este modo es actualizar un archivo *kml* con los datos de la base de datos de mensajes ADS-B. Este archivo se actualizará cada un tiempo fijado por el administrador. Además, a partir de los datos comandos seleccionados por el administrador se fijan diferentes reglas de visualización. Por ejemplo el administrador puede restringir la visualización de los aviones de una zona aunque haya datos disponibles de aviones en esa área. En la figura 5.4, se muestra la visualización del mapa del servidor, con datos simulados de aviones en Bariloche, Mendoza y Buenos Aires, donde cada ciudad representa un cliente diferente.

#### 5.3.6. Futura aplicación del sistema cliente-servidor

En el capítulo 8, se hará un análisis de los sistemas de multilateración MLAT. Para obtener la posición de una aeronave, se necesita que cuatro o más receptores obtengan el mismo mensaje. Midiendo la diferencia de tiempos en la que un mismo mensaje llega a cada receptor, se puede triangular la posición del emisor del mensaje.

Aprovechando el sistema cliente-servidor desarrollado, se puede implementar un algoritmo de estimación de posición de aeronaves mediante MLAT en el servidor. Si a cada mensaje que envía el cliente hacia el servidor se le agrega una etiqueta de tiempo





**Figura 5.4:** Mapa de cobertura del servidor ADS-B. Se visualizan aeronaves simuladas de Bariloche, Mendoza y Buenos Aires

de arribo de la señal y el servidor conoce la posición exacta del receptor del cliente, entonces, utilizando el algoritmo que se describirá en el capítulo 8, se podrá estimar la posición de la aeronave emisora.

## 5.4. ASTERIX

ASTERIX (*All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange*), es un estándar para intercambio de información de servicios de tráfico aéreo (*Air Traffic Services*, ATS). Es desarrollado y mantenido por la organización europea *Eurocontrol*. Hoy, ASTERIX representa el estado del arte de los formatos de datos de vigilancia aérea y es adoptada por usuarios alrededor del mundo como un estándar universal.

ASTERIX es un estándar extensible con un gran número de diferentes categorías, cada una de las cuales trabaja en un tipo particular de información. Estas incluyen reportes de aeronaves detectadas por sensores de vigilancia como radares, como también información procesada como trayectorias y varios mensajes de estado del sistema de vigilancia.

Dentro de las categorías que cubre el estándar, la categoría 021 contempla mensajes del tipo ADS-B [20]. Sin embargo, para el desarrollo del sistema, se ha decidido utilizar el estándar de la categoría 048 (ya que se cuenta con un consola capaz de proyectar los datos recibidos en formato ASTERIX en esa categoría), la cual se puede utilizar para



enviar datos de cualquier sistema de monoradar como radares SSR, radares monopulso, Modo S o radares primarios.

La estructura de mensajes de esta categoría se encuentra en la siguiente referencia [20]. Para el desarrollo de un sistema ADS-B capaz de enviar información bajo el estándar ASTERIX cat 048, los parámetros que se deberán rellenar en la estructura especificada en el manual de *Eurocontrol* [21] son:

1. **SAC y SIC:** es necesario enviar en cada mensaje el Código de Área del Sistema (SAC) y el Código de Identificación del Sistema (SIC). El SAC es un código único que la ICAO le asigna a cada país, para Argentina SAC=226. Mientras que el SIC, es un código que la ICAO le asigna a los aeropuertos de cada país, para el aeropuerto de Bariloche SIC=7.
2. **Tiempo del día del mensaje:** se informa el tiempo en el que se envía el mensaje en cantidad de segundos desde que comienza el día.
3. **Reporte de descripción del blanco:** en este campo se debe informar el tipo de sensor utilizado para detectar blancos, detección PSR, SSR, Modo S, SSR+PSR, Modo S *All-Call*, etc).
4. **Posición del blanco en coordenadas polares:** se debe hacer una conversión de coordenadas geodésicas a azimuth, elevación y rango.
5. **Nivel de vuelo del blanco:** se informa la altura del vuelo en *Flight Level* (FL). Donde un FL equivale a aproximadamente 30m.
6. **ICAO aircraft address:** se debe enviar esta dirección codificada en tres segmentos en formato octal.
7. **Número de vuelo:** al igual que en la dirección de aeronave, se debe informar el número de vuelo en 6 segmentos en formato octal.
8. **Velocidad en coordenadas polares:** se debe hacer una conversión de la velocidad en coordenadas cartesianas a coordenadas polares, informando magnitud de la velocidad y apuntamiento.

Generalmente, ASTERIX se transmite utilizando el protocolo de datagramas de usuario (*User Datagram Protocol*, UDP), entonces, éste será el protocolo de transporte utilizado para enviar este tipo de datos.

Para probar el módulo de transmisión ASTERIX del sistema ADS-B desarrollado, se cuenta con dos herramientas muy útiles. La primera herramienta es *WireShark*, un programa que captura mensajes que circulan por diferentes redes [22]. Si se transmite la información por el puerto 8600, entonces *WireShark* cuenta con un analizador de

paquetes ASTERIX, por lo que se podrá analizar si se está codificando la información correctamente dentro del estándar de la categoría 048. En la figura 5.5 se muestra una captura de pantalla de los mensajes ASTERIX que circulaban sobre la red WiFi de una computadora.

ip.addr == 239.255.43.21				
Time	Source	Destination	Protocol	Length
0.010980	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.231589	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.318918	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.378516	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.500592	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.834117	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.848231	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
0.920013	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
1.037979	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
1.123996	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
1.218307	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
1.681566	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
1.695145	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
1.925888	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73
2.085877	10.73.98.167	239.255.43.21	ASTERIX	73

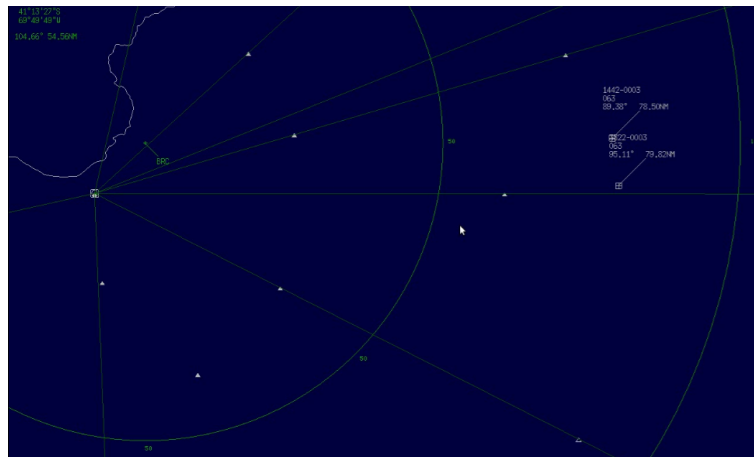
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.73.98.167, Dst: 239.255.43.21				
> User Datagram Protocol, Src Port: 56680, Dst Port: 8600				
▼ ASTERIX packet, Category 048				
Category: 48				
Length: 31				
▼ Asterix message, #01, length: 27				
FSPEC				
> 010, Data Source Identifier				
> 140, Time of Day				
> 020, Target Report Descriptor				
> 040, Measured Position in Polar Co-ordinates				
> 090, Flight Level in Binary Representation				
> 130, Radar Plot Characteristics				
> 220, Aircraft Address				
> 240, Aircraft Identification				

0000	01 00 5e 7f 2b 15 48 d2	24 6c 64 4b 08 00 45 00	..^..+..H. \$ldK..E.
0010	00 3b 0a a2 00 00 01 11	27 0c 0a 49 62 a7 ef ff	.;j.....'..Ib...
0020	2b 15 dd 68 21 98 00 27	b8 e1 30 00 1f f7 c1 00	+..h!..'..0.....
0030	e2 07 00 04 e6 80 46 71	3f c1 00 ff 05 50 20 03	.....Fq ?.....P .
0040	a0 f4 a2 10 13 31 c3 78	20	.....1.x

**Figura 5.5:** Captura de pantalla de mensajes ASTERIX en la aplicación *WireShark*.

La segunda herramienta utilizada es una consola de INVAP S.E preparada para recibir y visualizar mensajes de ASTERIX categoría 048. Además de servir como herramienta de validación de datos, esta consola se puede utilizar como herramienta para que las ATC puedan hacer un seguimiento adecuado de las aeronaves dentro de la zona de cobertura. Si bien la consola no está preparada para visualizar todos los campos de ADS-B, se puede detectar correctamente el rango, el apuntamiento y el nivel de vuelo. Para poder visualizar la dirección de aeronave, el número de vuelo o la velocidad, se deben llenar unos campos especiales contemplados en la categoría 048 con esa información para que la consola pueda interpretar esos datos. La consola debe ser configurada con un número de IP, número de IP del *gateway* y número de puerto, para que todos los receptores que lo deseen se puedan conectar a ella. Además, se deben seleccionar el SAC y el SIC de la ATC correspondiente a esa consola. En la figura 5.6, se muestra el mapa de la consola, donde se detectan vuelos en el área de cobertura del aeropuerto de Bariloche.



**Figura 5.6:** Visualización del mapa de la consola ASTERIX que recibe datos de aviones dentro de la zona de cobertura de Bariloche.

## 5.5. Resumen capítulo 5

Este capítulo cierra la cadena final del sistema de ADS-B. Si bien en los capítulos 7 y 8 se tocarán tópicos que pueden ser agregados al sistema, como los sistemas de dirección de arribo y de multilateración, se puede decir que se ha pasado por todos los eslabones necesarios para la elaboración de un sistema de recepción para señales ADS-B.

Se vieron diferentes aplicaciones destinadas al usuario que se pueden realizar con los datos recibidos. Armado de bases de datos estructuradas por avión, visualización de las aeronaves en tiempo real, visualización de trayectorias, sistemas cliente-servidor para ampliar coberturas, comunicación con las ATC bajo un estándar internacional como es ASTERIX, entre muchas otras aplicaciones.

En el siguiente capítulo, se evaluará el desempeño del sistema de recepción que se ha desarrollado en este proyecto integrador. Se hará un análisis de muchos aspectos del receptor, que permitirá hacer optimizaciones que hagan de este prototipo un futuro producto comercial.

## Capítulo 6

# Desempeño del sistema de recepción

*“Atreverse: tal es el precio del progreso.”*

— Los Miserables, Víctor Hugo.

Cuando el receptor ya está desarrollado, es necesario medir su desempeño. Hay muchos parámetros que se deben medir para poder concluir que el sistema funciona de manera adecuada. Entre esos parámetros, se pueden mencionar el área de cobertura del receptor, la correcta interpretación de todos los mensajes que puede emitir el *transponder*, la capacidad de procesar en tiempo real, la capacidad de funcionar en un entorno de muchas aeronaves, etc. Para hacer estas pruebas de desempeño, se han utilizado diferentes herramientas, entre ellas, un simulador de entorno de radar, el cual sirve para simular escenarios que no serían sencillos de observar en un entorno real. También, se han hecho pruebas en el aeropuerto para medir coberturas, curvas de validación de potencia, comparar trayectorias de aviones con otros sensores, etc. Para todas las pruebas, se ha utilizado el procesador 2 en el receptor.

A continuación, se hará una descripción detallada de todas las mediciones realizadas para medir el desempeño del sistema de recepción y, a partir de ellas, sacar algunas conclusiones.

### 6.1. Mediciones con el simulador de entorno de radar (RES)

Un simulador de entorno de radar (*Radar Environment Simulator*, RES) es una herramienta que permite hacer simulaciones de diferentes escenarios aéreos. Éste es capaz de simular aeronaves con diferentes alturas de vuelo, recorridos, velocidades, etc. Además, cada aeronave se puede equipar con diferentes *transponders*, es decir, que

tendría la capacidad de brindar la información de Modo A, Modo C, Modo S y otros sistemas de Vigilancia basadas en Radares Secundarios (*Surveillance Systems*, SSR), como también existe la posibilidad de hacer simulaciones de sistemas de Vigilancia basadas en Radares Primarios (*Primary Surveillance Radar*, PSR).

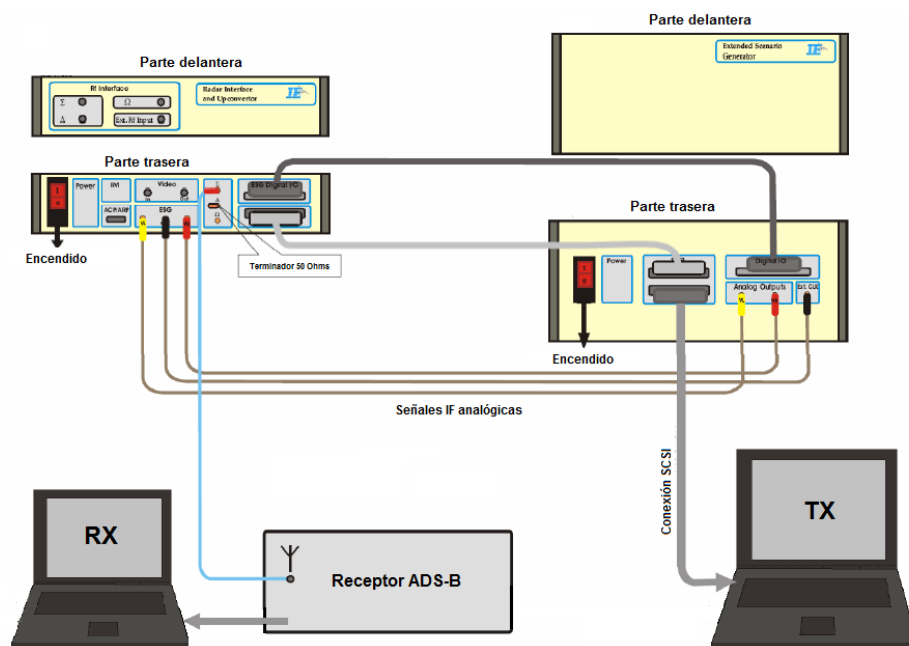
Para este trabajo, se utilizó el RASS-S (*Radar Analysis Support System for Site Measurement*) de la empresa *Intersoft Electronics*. Este sistema permite hacer simulaciones del tipo RES y está conformado por dos equipos. El primer equipo, llamado Generador de Escenario Extendido (*Extended Scenario Generator*, ESG), es el encargado de hacer la generación del escenario de aeronaves seleccionadas por el usuario en banda base. La señal de salida de este equipo es subida a una frecuencia intermedia IF, ésta será la entrada del segundo equipo. El segundo equipo, llamado Interfaz de Radar (*Radar Interface and Up-Converter*, RIUC), se encarga de llevar la entrada en IF a la frecuencia de RF correspondiente, para el caso de ADS-B a  $1090\text{MHz}$ . Luego la salida de RF será la entrada al dispositivo de ensayo, que en este caso será el sistema de recepción para señales del tipo ADS-B desarrollado (es recomendable poner un atenuador a la entrada del receptor). Además, el RASS-S cuenta con un software con interfaz gráfica hecho en *LabView* que permite al usuario seleccionar diferentes parámetros, de los cuales se pueden mencionar los siguientes

1. **Parámetros de vuelo de avión:** velocidad, tiempo de vuelo, trayectorias, apuntamiento del avión, etc.
2. **Transponder de cada avión:** tipo de *transponder* para la comunicación con los sistemas de vigilancia.
3. **Cantidad de mensajes por unidad de tiempo:** seleccionar qué mensajes enviar o no, y a qué tasa temporal.
4. **Generación de escenarios de interferencia:** posibilidad de generar *garbling* y *FRUIT*.
5. **Potencia de transmisión de los *transponders*:** posibilidad de seleccionar la potencia de cada uno de los *transponders* de la aeronave.

La computadora que corre el software se conecta al ESG mediante una interfaz SCSI. En la figura 6.1, se ve un esquema de las conexiones necesarias para poder realizar una simulación del tipo RES con el sistema desarrollado. Para ver más información acerca de estos equipos habrá que referirse a los manuales de usuario [23].

Las simulaciones realizadas con el RES que se ha implementado fueron:

1. Validación de decodificación de mensajes.
2. Calidad de señal y detección de mensajes.



**Figura 6.1:** Esquemas de conexiones necesarias para hacer un RES con el equipamiento disponible.

3. Capacidad de trabajo del receptor en escenarios de varias aeronaves y mensajes por unidad de tiempo.

### 6.1.1. Validación de decodificación de mensajes

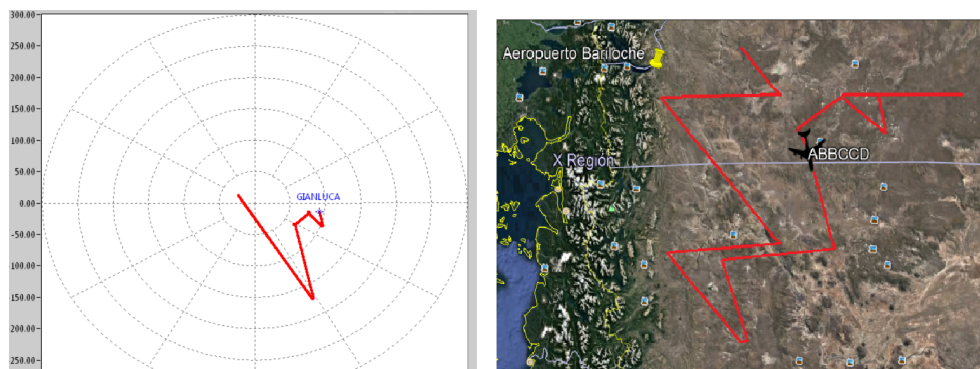
Lo primero que es necesario comprobar es si el decodificador de mensajes ADS-B hace correctamente su trabajo. Para ello, se crearon escenarios conocidos donde se envían todos los mensajes posibles que el receptor sea capaz de decodificar. Por lo tanto, se comprueba que los mensajes de posición correspondan a la trayectoria seleccionada en el RES, los mensajes de velocidad correspondan a la velocidad seleccionada al avión, al igual que el apuntamiento de las aeronaves, etc.

Cada vez que se vio que el receptor no decodificaba correctamente el mensaje que se esperaba, se debía hacer una revisión y mejora en el software de decodificación diseñado. Como por ejemplo a la hora de hacer el seguimiento de un avión había disimilitudes, tal como se ve en la figura 6.2.

### 6.1.2. Calidad de señal

#### Señal a diferentes tasas de muestreo

El RES también permite ver la calidad de señal que llegará al receptor. El simulador genera la señal de ADS-B tal como lo indica la normativa de ICAO, de forma que se puedan ver los flancos ascendentes y descendentes. Se aprovecha la señal ADS-B a la

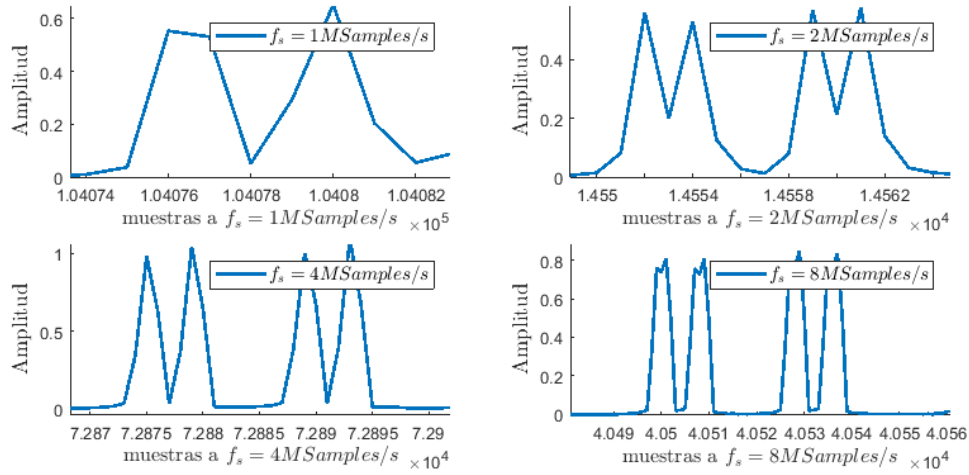


**Figura 6.2:** Comparación entre la trayectoria seleccionada en el RES y la decodificada.

salida del RES para ver la forma de las señales en el receptor a diferentes tasas de muestreo. De esta forma, se podrá analizar cuál es la frecuencia de muestreo ideal para trabajar en la recepción. En la figura 6.3, se observan los preámbulos de una misma señal ADS-B muestreados a diferentes tasas. Se observa que para una tasa de muestro de  $fs = 1MSamples/s$  el preámbulo es irreconocible, lo cual es lógico, ya que, se está muestreando a una tasa menor al ancho de banda de la señal. Para el muestreo a  $fs = 2MSamples/s$  el preámbulo es distinguible, pero aún está demasiado justo. Con esa frecuencia de muestreo, se asegura una muestra por *chip* de mensaje, lo cual puede ser riesgoso, ya que esa única muestra puede ser tomada en un flanco descendente o ascendente y estropear la recepción del mensaje. Es por eso, que al menos, se necesitan dos muestras por *chip*, eso significa una  $fs = 4MSamples/s$ . Como se ve en la figura, la señal a esa  $fs$  es más nítida, y recrea correctamente la forma de preámbulo, lo que hará que el puntaje en el detector de preámbulo 3.1.4 sea alto y supere el umbral en caso de que se halle una señal ADS-B. Utilizando una  $fs = 8MSamples/s$  se logra obtener una señal sumamente nítida, tal como muestran los ejemplos de los libros. Muestrear a una tasa más alta es más beneficioso, ya que, se puede reconstruir de mejor forma la señal original, pero el costo computacional es mayor. Muestrear a  $fs = 8MSamples/s$  requiere tomar el doble de muestras que a  $fs = 4MSamples/s$ , lo que computacionalmente implica mas memoria utilizada y mayor tiempo de procesamiento. Como se ve que la señal a  $fs = 4MSamples/s$  aproxima bastante bien a la forma de la señal, se usará esta tasa de muestreo para la recepción, elección que sale de hacer un *trade off* entre calidad de señal y costo computacional.

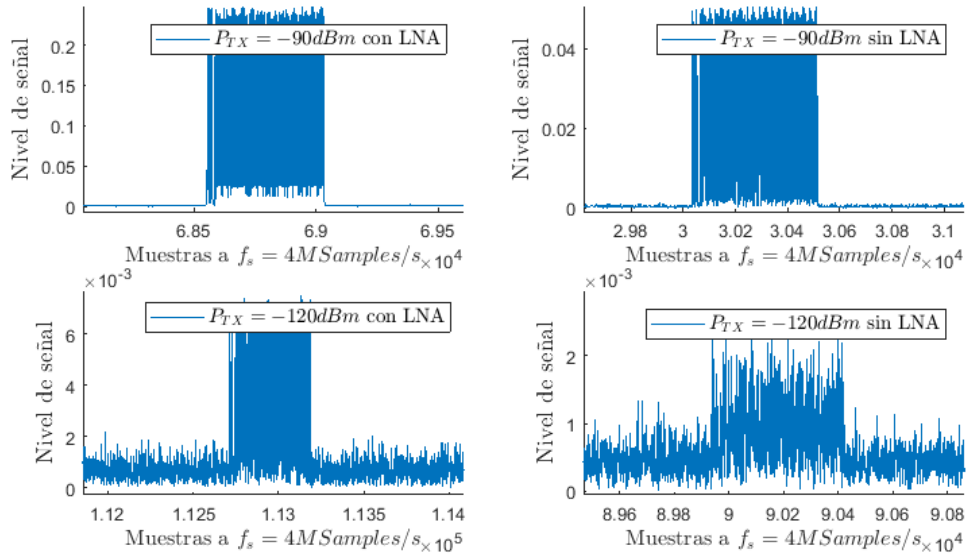
### Señal en diferentes escenarios de ruido

La señal ADS-B puede llegar con diferentes potencias y con diferente nivel de ruido AWGN. En esta medición, se vio como era la señal recibida a diferentes potencias utilizando el receptor con LNA y sin LNA. En la figura 6.4, se ven las señales recibidas con nivel de potencia de llegada de  $-90dBm$  y  $-120dBm$ . Se ve cómo las señales a



**Figura 6.3:** Comparación de los preámbulos de una señal ADS-B a diferentes tasas de muestreo.

$-90\text{dBm}$  son distinguibles y se ve una leve superioridad en el piso de ruido cuando se usa el receptor sin LNA. En el caso donde la potencia recibida es  $-120\text{dBm}$  los pisos de ruido aumentan considerablemente, aunque la señal del receptor con LNA sigue siendo distinguible, mientras que el caso del receptor sin LNA la señal está sumergida en el ruido, por lo que las probabilidades de detección caerán considerablemente.



**Figura 6.4:** Calidad de las señales ADS-B con diferentes potencias de recepción, utilizando el receptor con LNA y sin LNA.

En la tabla 6.1, se pueden ver aún más los beneficios de usar un LNA. Se muestra la cantidad de mensajes recibidos de un total de mensajes enviados, para diferentes potencias de recepción. Los valores de potencia recibida son bajos para poder ver mejor los efectos de degradación de señal. Se ve que a medida que la potencia recibida disminuye, la cantidad de mensajes recibidos decae. Algo interesante de ver es que, a



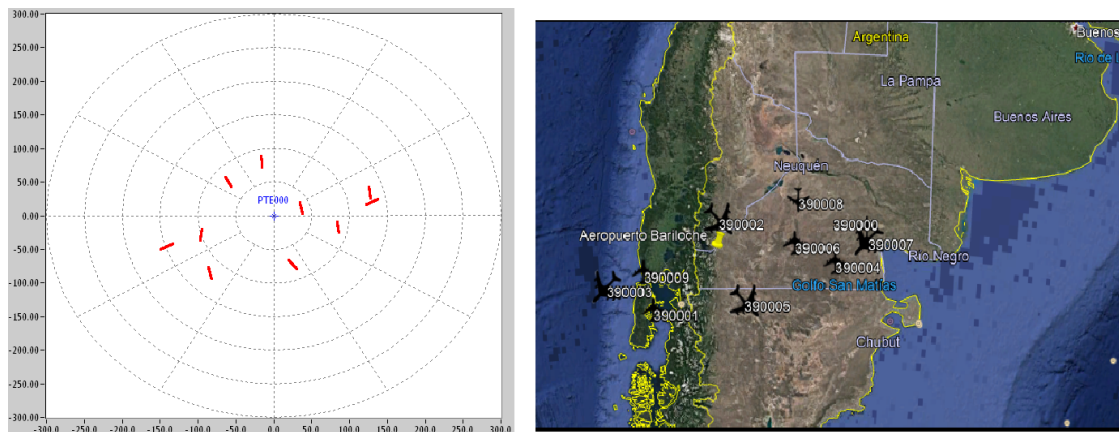
los  $-100\text{dBm}$ , la cantidad de mensajes recibidos cae a 2237 mensajes en el receptor sin LNA, y a los  $-110\text{dBm}$  el receptor con LNA toma un valor muy parecido a esos 2237 mensajes, y así a medida que la potencia recibida disminuye. Eso se puede deber a la ganancia del LNA que es de  $12\text{dB}$ , ventaja predecible de antemano. Lo que es notable es que, para potencias recibidas mucho más bajas, el receptor con LNA puede seguir detectando mensajes mientras que el receptor sin LNA ya no detecta ninguno. Esto es debido a la baja figura de ruido del sistema que utiliza el LNA. Éste pone en mejores condiciones a la señal respecto al ruido, porque la amplifica sumándole poco ruido. Más adelante en este capítulo, se explicará este fenómeno.

$P_{RX}$	con LNA	sin LNA	Generados
-90dBm	2700	2700	2700
-100dBm	2700	2237	2700
-110dBm	2260	1730	2700
-120dBm	1624	586	2700
-130dBm	594	0	2700
-140dBm	345	0	2700

**Tabla 6.1:** Mensajes detectados por el receptor con y sin LNA, para diferentes potencias de señales recibida.

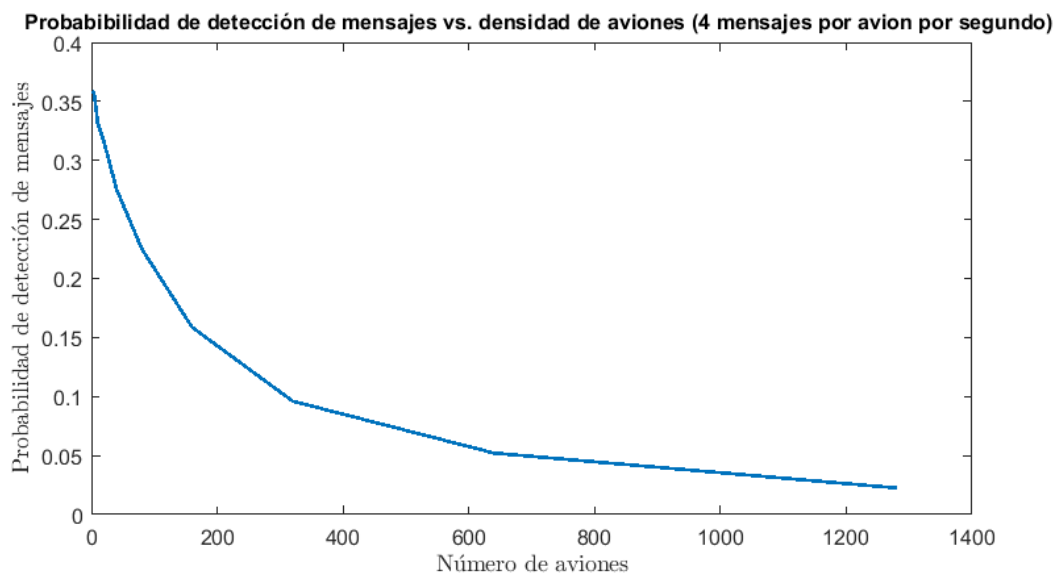
### 6.1.3. Capacidad de trabajo del receptor en escenarios de varias aeronaves y mensajes por unidad de tiempo

El RES permite simular escenarios de hasta 2000 aviones en el área de cobertura del receptor. Simular estos entornos es muy útil, ya que es muy difícil encontrar escenarios de tantos aviones. Por ejemplo, en el radio de cobertura de la ciudad de Bariloche, la cantidad de aviones que sobrevuelan el área al mismo tiempo no supera los diez, lo que imposibilita hacer mediciones en donde se exija el procesamiento del sistema de recepción. En la figura 6.5, se ve la generación de un escenario compuesto por diez aviones y su correspondencia en el mapa del receptor. El RES cuenta con la opción de generar escenarios aleatorios, donde se puede seleccionar la cantidad de aviones y la cantidad de mensajes seleccionados. A partir de esta generación aleatoria, se probó el desempeño del receptor para diferentes cantidades de aviones y un número fijo de mensajes por unidad de tiempo por aeronave. Se seleccionó un tiempo de duración igual para cada escenario y se midió el número de mensajes recibidos a medida que fue subiendo la cantidad de aviones. En la figura 6.6, se ve la curva de porcentaje de mensajes recibidos sobre los emitidos para distintas cantidades de aviones con un tasa de 4 mensajes por segundo por avión. La curva comienza con un porcentaje de aproximadamente el 40 % cuando la cantidad de mensajes es pequeña. La causa de esta limitación en la tasa de recepción se debe a la incapacidad del sistema en procesar en



**Figura 6.5:** Generación de un escenario de 10 aviones con el RES, junto con el mapa del receptor correspondiente a ese escenario

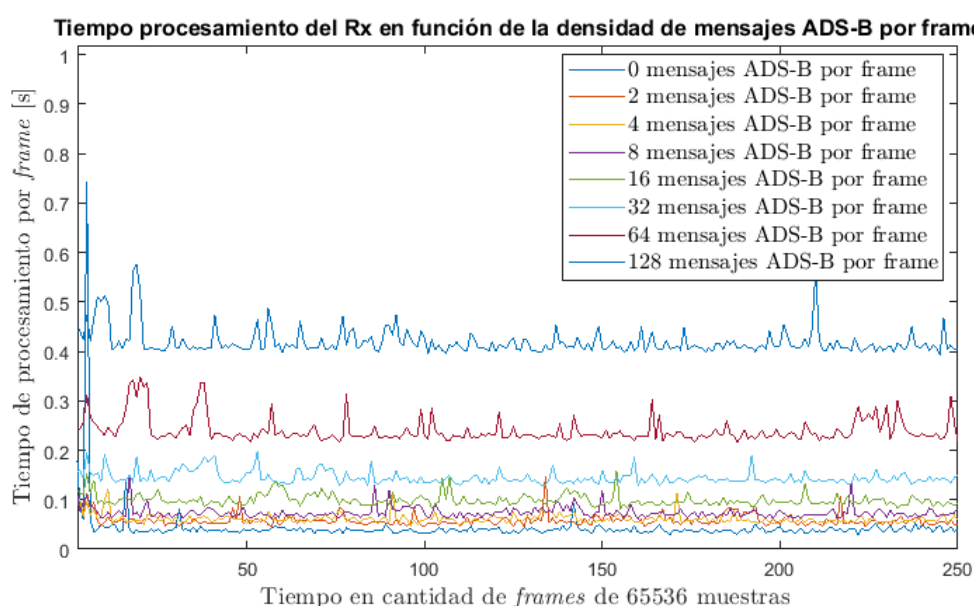
tiempo real, como se mencionó anteriormente en el trabajo. Se ve que el porcentaje de mensajes recibidos decrece a medida que la cantidad de aviones sube. Eso es debido a que el número de mensajes por unidad de tiempo en el receptor aumenta, por lo que el procesador estará más cargado. Esto hace que el procesador tarde más tiempo en procesar, entonces, el tiempo de procesamiento de *frame* aumentará. Como el tiempo de *frame* aumenta, el procesador se aleja cada vez más del procesamiento en tiempo real. Esto quiere decir que hay mensajes que no están siendo capturados. Por lo tanto, el porcentaje que se ve en la curva es equivalente a la probabilidad de detección de mensajes.



**Figura 6.6:** Curva de probabilidad de detección de mensajes en función del número de aviones que sobrevuelan el área de cobertura del receptor.

Claramente, lo que hace al procesador más lento es el número de mensajes por unidad de tiempo, y no el número de aviones que sobrevuelan la zona. Es decir, puede haber un avión que esté emitiendo 7000 mensajes por segundo, que para el receptor

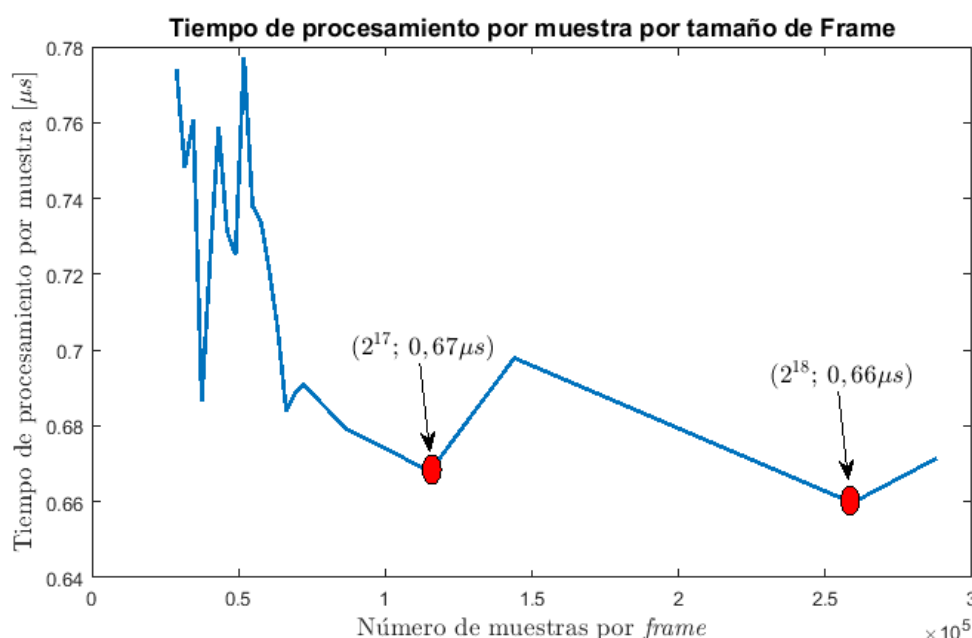
será lo mismo que 10 aviones emitiendo 700 mensajes por segundo. Es por eso que se decidió realizar una medición de cuánto es el tiempo de procesamiento por *frame* en función del número de mensajes dentro de un mismo *frame*. En la figura 6.7, se observa el tiempo de procesamiento por *frame* para diferentes cantidades de mensajes por *frame* (potencias de 2). El tamaño de *frame* es fijo en 65536 muestras. El tiempo requerido para procesamiento en tiempo real a una tasa de muestro  $fs = 4MSamples/s$  y a un tamaño de *frame* de 65536 muestras es 0,016384s. Se ve que hasta 16 mensajes por *frame* el tiempo de procesamiento por frame es menor a 0,1s, lo cual hace que aunque no se procese en tiempo real. La normativa de la ICAO dice que el receptor debe ser capaz de actualizar los mensajes de cada aeronave al menos una vez por segundo. Por lo tanto el *trade off* entre tiempo de actualización de mensajes de aeronaves y tiempo de procesamiento es bueno cuando la cantidad de mensajes en un frame es pequeña. Mientras en el caso en el que se procesen 128 mensajes por *frame*, el tiempo de procesamiento sube a casi 0,5s, lo cual disminuye significativamente la probabilidad de detectar nuevos mensajes, por lo que la actualización será muchos más lenta.



**Figura 6.7:** Tiempo de procesamiento por *frame* en función de la densidad de mensajes ADS-B en cada *frame*.

Por último, se hará un análisis en donde se medirá el tiempo de procesamiento por muestra en función del tamaño de *frame*. Esta medida será de suma utilidad, ya que permitirá elegir el tamaño de *frame* óptimo para un procesamiento más veloz, teniendo en cuenta las limitaciones físicas del procesador. Y además, en caso de cambiar de procesador a uno con mejores prestaciones, esta medida servirá para elegir un procesador que mejore el tiempo de procesamiento por muestra. En la figura 6.8, se puede ver la curva medida para tamaños de *frame* entre  $2^{15}$  y de  $2^{18}$  muestras. La frecuencia de muestreo elegida fue  $fs = 4MSamples/s$ . Se puede ver que para tamaños de *frame*

de  $2^{17}$  y  $2^{18}$  muestras, se pueden encontrar mínimos en el tiempo de procesamiento por muestra alrededor de los  $0,67\mu s$ . Esto es debido a que el programa a cargo de gestionar la SDR funciona más rápido para ciertos tamaños de *frame* seleccionados. Para este proyecto, se decidió usar un tamaño de  $2^{17}$  muestras por *frame*, el motivo es debido a que se desea no tener la memoria RAM de la computadora tan cargada de espacio. Ese tamaño de muestras equivale a un tiempo de procesamiento por *frame* de  $0,087s$ , muy cercano al tiempo de procesamiento en tiempo real que para este caso sería  $0,0327s$ . Estos tiempos de medición se han logrado usando una CPU Pentium Inside de  $2,2GHz$  y dos núcleos de procesamiento, y una memoria RAM de  $8GBytes$ . Para mejorar el rendimiento de este receptor, una de las acciones que se toman es utilizar CPUs o memorias RAM que mejoren las prestaciones de las que se utilizaron.



**Figura 6.8:** Tiempo de procesamiento por muestra para diferentes tamaños de *frame*.

## 6.2. Mediciones en el aeropuerto

En esta sección, se harán mediciones de campo, probando al sistema de recepción en un entorno real. Para ello, se ha elegido el aeropuerto internacional de Bariloche, donde INVAP posee una facilidad en la cual se pudieron hacer diferentes mediciones. Entre ellas, medición del área de cobertura, validación de trayectorias con otras fuentes ADS-B, medición de curva rango-potencia y medición del ángulo de arribo de la señal (se verá en el capítulo 7).

### 6.2.1. Área de cobertura del receptor

Para la medición de área de cobertura hay dos factores limitantes cuando se miden señales ADS-B. Un factor es la sensibilidad del receptor, es decir, la mínima potencia que el receptor es capaz de distinguir para una probabilidad de error dada. El otro factor es la línea de vista (*line of sight, LoS*). En ADS-B es necesario que el receptor tenga *LoS* con todas las aeronaves dentro de su zona para poder recibir sus señales, por lo tanto las alturas de vuelo también serán un factor clave para delimitar el área de cobertura.

A continuación, se hará una predicción teórica de cual sería el factor limitante del receptor para definir el área de cobertura.

#### Análisis teórico

Se desea calcular el alcance que tendrá el equipo receptor de señales de tipo ADS-B. Para ello, se utilizará la ecuación de Friis [24] y datos típicos, como la potencia transmitida por los *transponders*, las características del terreno, las ganancias de antenas y de amplificadores, las pérdidas en los conectores y cables, entre otros. La ecuación a utilizar para medir la potencia en el receptor es la siguiente:

$$P_{RX} [dB] = P_{TX} + G_{TX} - L_{FS} - F_M + G_{RX} + G_{AMP} - L_C [dB], \quad (6.1)$$

donde  $P_{RX}$  es la sensibilidad del equipo receptor,  $P_{TX}$  la potencia transmitida por el *transponder* de la aeronave,  $G_{TX}$  la ganancia de la antena transmisora,  $L_{FS}$  las pérdidas en el espacio libre,  $F_M$  el margen por *fading*,  $G_{RX}$  ganancia de la antena receptora,  $G_{AMP}$  la ganancia del amplificador de bajo ruido y  $L_C$  las pérdidas por cables y conectores. Todos los valores están expresados en decíbeles.

Las ecuaciones utilizadas para las pérdidas en el espacio libre y el margen de *fading* son las siguientes:

$$L_{FS} [dB] = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (6.2)$$

$$F_M [dB] = 30 \cdot \log(R[km]) + 10 \cdot \log(6ABf[GHz]) - 10 \cdot \log(1 - C) - 70 \quad (6.3)$$

En la ecuación 6.2, se puede apreciar que  $R$  es el rango entre la aeronave y la estación de radio base y  $\lambda$  la longitud de onda de la señal transmitida. Mientras tanto, la ecuación 6.3 [25] es una ecuación que refleja las pérdidas en forma probabilística debidas al clima y al terreno donde se encuentre el sistema de comunicación, es una cota superior para asegurar una comunicación fiable.  $A$  es el factor de rugosidad del terreno y  $B$  es el factor de conversión de peor probabilidad de lluvia mensual llevado a anual.  $C$  es la confiabilidad del sistema.

El receptor que se utilizará tiene las siguientes características

$G_{RX}$	$5dBi$
$G_{AMP}$	$12dB$
$L_C$	$4,5dB$

La confiabilidad del sistema  $C$  que se utilizará será la calculada con el RES en 6.1.3. Con una densidad de aviones baja como la que se puede encontrar en el aeropuerto de Bariloche, la capacidad del sistema será aproximadamente del 37 %.

Para el transmisor, se debe considerar la potencia en la cual los *transponders* emiten las señales. Estas potencias de transmisión dependen de la altura donde estén volando los aviones. Para aeronaves donde el avión vuela por debajo de los  $4500m$ , la potencia de transmisión mínima será de  $P_{TX}(< 4500m) = 18,5dBW$ , mientras que las aeronaves que superan esa altitud transmiten a una potencia mínima de  $P_{TX}(> 4500m) = 21dBW$  [5].

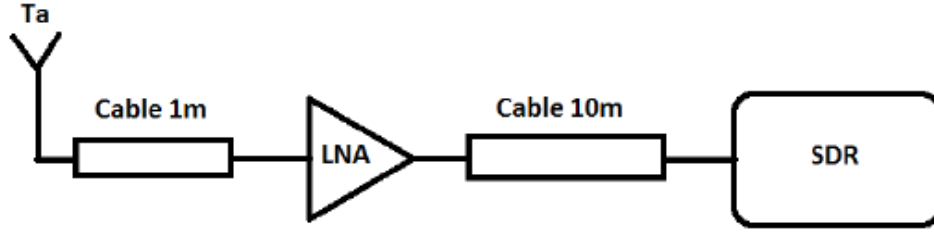
Para la ciudad de Bariloche, se utilizará el factor de rugosidad de terreno  $A = 0,125$  y el factor de conversión de peor probabilidad de lluvia mensual llevado a anual  $B = 0,25$ , ya que es un terreno seco y montañoso [25].

Por otro lado, cuando se calculan sensibilidades de sistema, se debe especificar qué probabilidad de error de bit (*Bit Error Rate, BER*) se espera obtener con esa potencia mínima que llega al receptor. Para el sistema de recepción que se ha diseñado, se espera obtener una  $BER = 10^{-6}$ , lo cuál asegura una probabilidad de detección ( $P_d$ ) de paquetes ADS-B mayor al 99 %. La manera de relacionar la  $P_d$  y la  $BER$  es la siguiente

$$P_d = \alpha \cdot (1 - BER)^{112}, \quad (6.4)$$

donde se considera que para que un mensaje sea correctamente detectado no debe haber errores en los 112 bits de la cadena. Además, otros factores como el tiempo de procesamiento, la detección de preámbulo, la decisión de bits, etc. interfieren en esta igualdad, los cuales se consideran en el factor  $\alpha$  que puede estar entre 0 y 1. Para este análisis se supone a  $\alpha = 1$ , considerando que la probabilidad de detección depende únicamente de la BER, suponiendo los demás factores ideales. A partir de la BER esperada, se puede calcular la relación energía de bit frente a la densidad de potencia de ruido  $\frac{E_b}{N_0}$  utilizando curvas tabuladas. Por lo tanto, si se tiene la relación  $\frac{E_b}{N_0}$  y se sabe el  $N_0$  del sistema y el tiempo de duración de cada *chip*  $T_c$ , se puede estimar la sensibilidad  $P_{RX}$  del sistema usando 6.8.

Para calcular la temperatura de ruido equivalente del sistema  $T_{sys}$ , se utilizará la ecuación de Friis 6.5, la cual calcula  $T_{sys}$  a partir de las temperaturas equivalentes de ruido de cada componente de la cadena de recepción y sus respectivas ganancias o atenuaciones. En la figura 6.9, se muestran los componentes de la cadena de recepción que influyen en el cálculo de la  $T_{sys}$ .



**Figura 6.9:** Componentes de la cadena de recepción que influyen en el cálculo de la temperatura equivalente de ruido del sistema.

Para el caso del sistema de recepción, la ecuación de Friss se expresará de la siguiente manera

$$T_{sys} = T_{ant} + T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \frac{T_{e4}}{G_1 G_2 G_3}, \quad (6.5)$$

donde  $T_a$  es la temperatura equivalente de ruido de la antena receptora,  $T_{ei}$  es la temperatura equivalente de ruido del componente  $i$ -ésimo de la cadena y  $G_i$  es la ganancia o atenuación, expresada en veces, del componente  $i$ -ésimo. Para calcular las temperaturas equivalentes de ruido de los componentes, se utilizan las siguientes ecuaciones. Si el componente es activo se utilizará

$$T_e = 290K \cdot (10^{\frac{NF}{10}} - 1), \quad (6.6)$$

donde  $NF$  es la figura de ruido del componente, expresada en decíbeles. Y si el componente es pasivo se utilizará

$$T_e = 290K \cdot (10^{\frac{L}{10}} - 1), \quad (6.7)$$

donde  $L$  es la atenuación del componente, expresada en decíbeles. Los valores utilizados para el cálculo de la  $T_e$  del radar diseñado fueron:

$NF_{LNA}$	0,9dB
$NF_{SDR}$	< 8dB
$L_{cables}$	15dB/100m
$T_a$	(50K-60K)típico

Teniendo el valor de  $T_{sys}$ , la relación  $\frac{E_b}{N_0}$  para una  $BER$  dada y  $T_c$  de ADS-B igual a  $0,5\mu s$ , se puede usar la siguiente ecuación

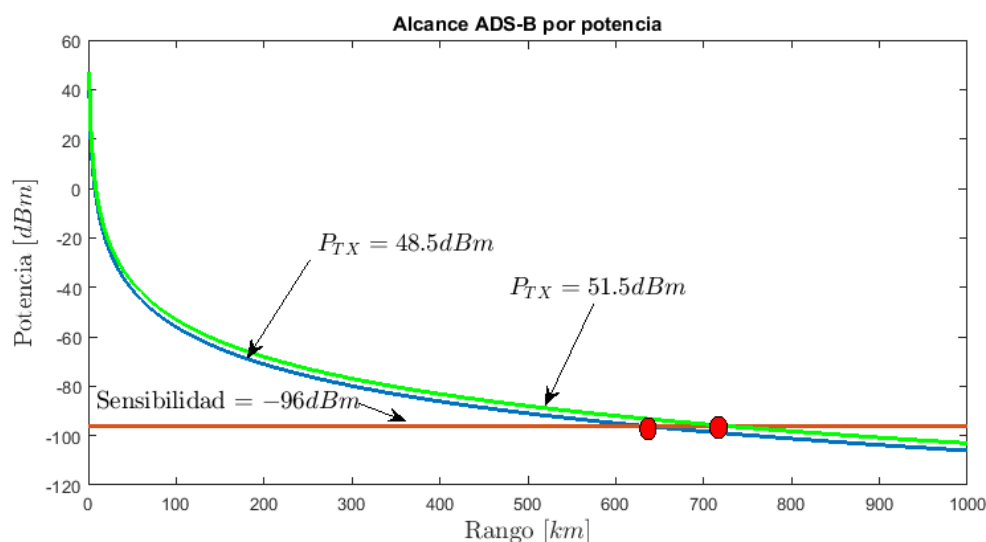
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{RX} T_c}{k T_{sys}}, \quad (6.8)$$

para obtener el valor de la sensibilidad del sistema.  $k$  es igual a la constante de Boltzmann. Para el receptor desarrollado, el resultado de la sensibilidad esperada es apro-



ximadamente  $P_{RX} = -96dBm$ .

Si se sabe la sensibilidad del sistema y se utiliza la ecuación 6.1, es posible estimar el rango máximo alcanzado por el receptor para las condiciones dadas. En la figura 6.10, se observa un gráfico de alcance del receptor para aviones que vuelan por encima de los 4500m de altura, y para los que vuelan por debajo de esa altura. Cuando las aeronaves vuelan por debajo de los 4500m el alcance del receptor sería aproximadamente 630km, mientras cuando vuelan por encima de ese límite el alcance sería 700km.



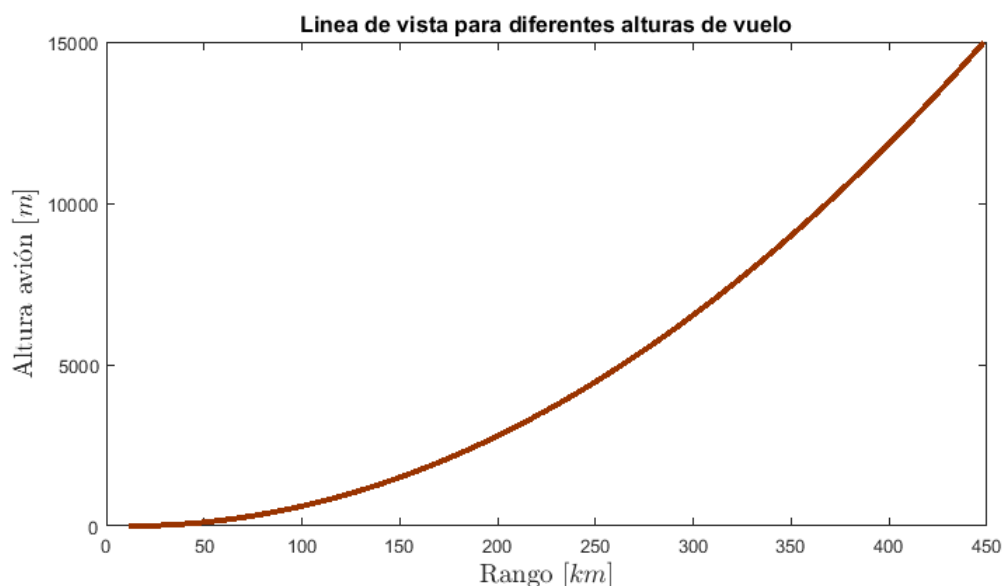
**Figura 6.10:** Curvas de alcance del receptor para aviones que vuelan por encima y por debajo de los 4500m de altura, para una sensibilidad específica.

Sin embargo, estos alcances son muy pretenciosos. Como se comentó anteriormente, hay otro factor influyente en el cálculo de área de cobertura del receptor, la línea de vista. Utilizando documentos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT [26], donde se hace mención al cálculo de *LoS* a partir de las alturas de las antenas receptoras y transmisoras, la curvatura de la tierra, y el número de zonas de Fresnel consideradas, se realizó una curva de rango alcanzado en función de la altura del transmisor, la cual se muestra en la figura 6.11. Para graficar la curva, se consideró una altura de receptor de 10m y que la energía se concentra en la primera zona de Fresnel. En esta curva, se puede observar que la máxima cobertura alcanzada por el receptor será 450km, si se consideran 15000m como máxima altura de un vuelo de aviación civil. Por lo tanto, en este caso, el factor limitante será la línea de vista.

### Medición de cobertura en el aeropuerto

Se llevó todo el sistema de recepción a la facilidad que INVAP tiene en el aeropuerto. Allí, se midió la cobertura del radar. La forma de medición fue tomar las primeras y las últimas ubicaciones de muchos aviones detectados por el receptor ADS-B. Además, se utilizaron mapas de línea de vista para comprobar el alcance. Los mapas de *LoS*



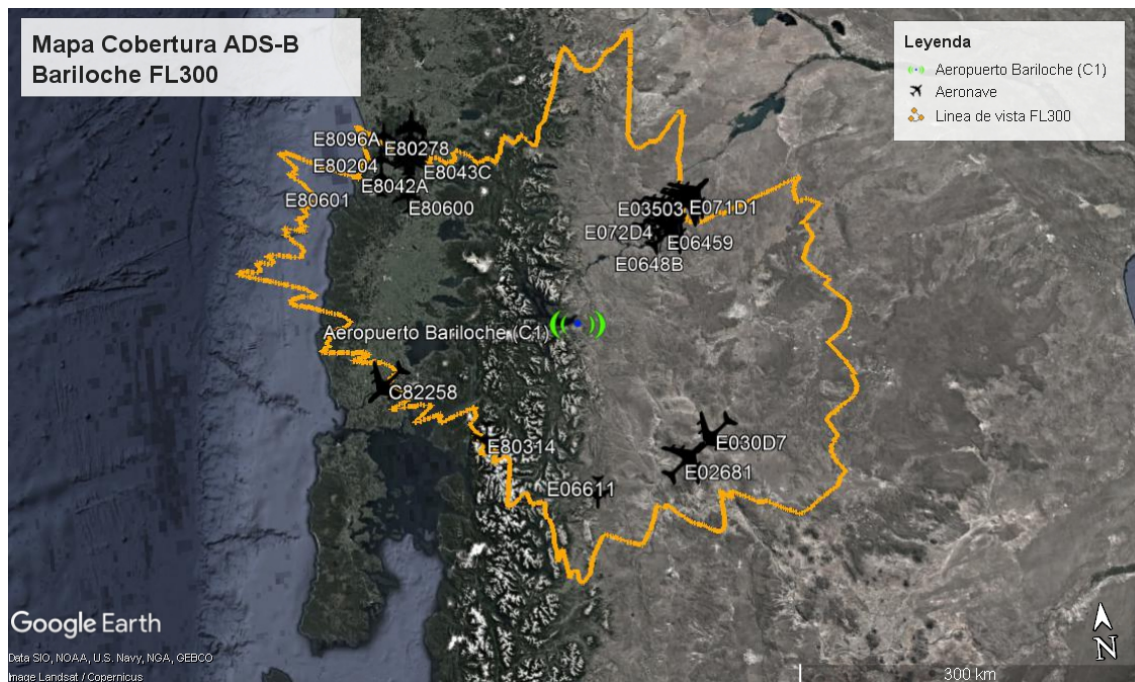


**Figura 6.11:** Curvas de alcance del receptor por línea de vista, para diferentes alturas de aeronaves.

tienen en cuenta el terreno donde será ubicado el radar y la altura del transmisor al que se desea tener *LoS*. En la figura 6.12, se muestra el alcance del receptor en Bariloche para aeronaves volando por encima de los 8000m, junto al mapa de línea de vista correspondiente a la ubicación del radar para un nivel de vuelo de 10000m (FL300). Se ve que las últimas posiciones de los aviones tomadas por el receptor coinciden con el punto correspondiente en el mapa de *LoS*. Los vuelos que están dentro del mapa de *LoS* son vuelos con alturas menores a los 10000m. Mientras tanto, en la figura 6.13, se ve cómo el avión con ICAO *aircraft address* C820CF, correspondiente a un vuelo de Buenos Aires con destino Auckland, sólo es visible dentro del área del mapa de *LoS* para esa altura de vuelo. De esta forma, se corrobora el análisis teórico hecho anteriormente, el cuál enuncia que para el sistema de recepción desarrollado, el factor limitante a la hora de medir la cobertura del receptor será la *LoS*.

### 6.2.2. Comparación de datos medidos con otras fuentes

Al igual que se hizo en la sección anterior con el RES, es una buena práctica comparar los resultados tomados con otras fuentes. En este caso, se compararon vuelos tomados en el aeropuerto por el receptor desarrollado con los datos obtenidos por la empresa *FlightRadar24*. En la figura 6.14, se puede ver la comparación entre las dos fuentes de información para el vuelo ANZ31 de Air New Zealand para la aeronave con ICAO *aircraft address* C820CF. Se ve como a un mismo horario hay una coincidencia en la posición del avión tanto en el mapa de *Google Earth* como en el de la página de *FlightRadar24*. Además, se puede ver cómo coinciden las trayectorias, que no se podían comparar utilizando el RES 6.1.1.



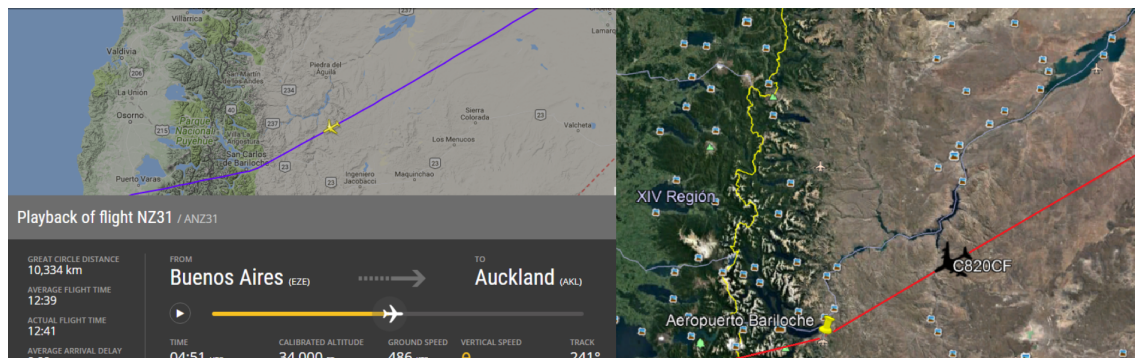
**Figura 6.12:** Cobertura del receptor ADS-B desarrollado para una altura de vuelo de 10000m medida en el aeropuerto de Bariloche



**Figura 6.13:** Trayectoria de una aeronave dentro del área de cobertura esperada.

### 6.2.3. Medición de curva de validación de potencia.

Es importante saber si los mensajes que se reciben en el receptor vienen de una fuente confiable o no. Como ya se vio en el capítulo 1, una de las desventajas de ADS-B es que la información no está encriptada. Esto hace que cualquier persona que tenga la capacidad de hacer un transmisor siguiendo las especificaciones de la ICAO, pueda



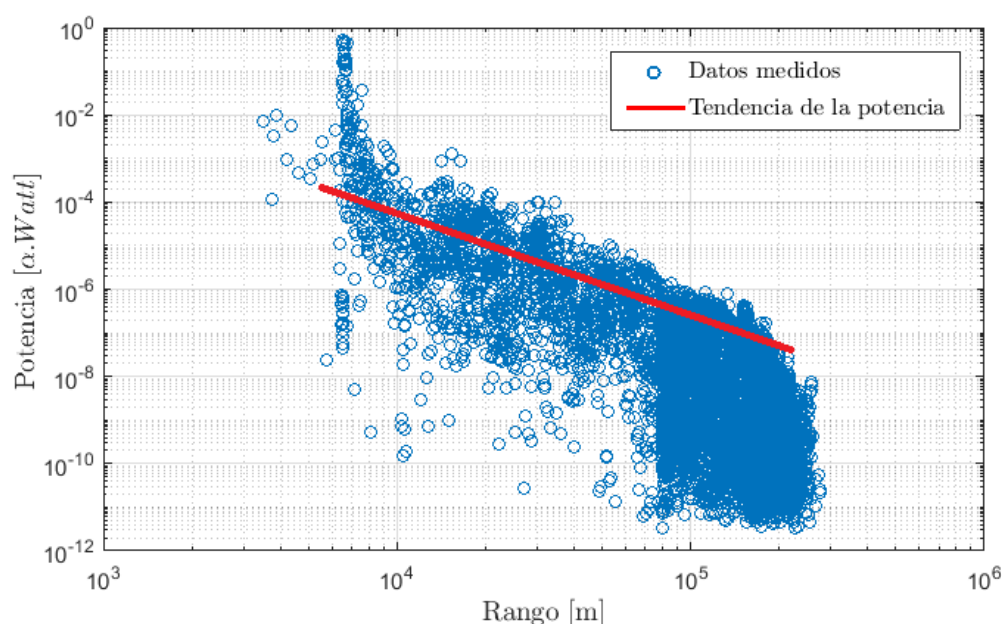
**Figura 6.14:** Comparación de trayectos entre el receptor desarrollado y un receptor de *Flightradar24*.

simular un *transponder* ADS-B. Una forma de evitar este inconveniente es midiendo la intensidad de potencia recibida en el receptor para cada rango detectado. De esta forma, se puede recrear una curva de validación. Entonces, cada vez que se reciba un mensaje ADS-B, la potencia deberá encontrarse dentro de los márgenes de la curva para ser validada. En la figura 6.15, se observa la curva de validación de potencia para el receptor desarrollado en el aeropuerto de Bariloche. Para la medición de esta curva, se tomaron solo los mensajes que informaban posición, luego, a partir de esas posiciones, se calculó el rango entre el receptor y esas posiciones, y a esos rangos calculados se les asignó el valor de la potencia media medida en el receptor para esos mensajes. Para recrear esta curva, se dejó el receptor sensando 3 días, los cuales fueron equivalentes a 10000 mensajes de posición. Se ve que la curva tiene márgenes amplios, los motivos pueden ser dados por el ruido en la recepción, a que la potencia de emisión de todos los *transponders* varíen o que las condiciones del área de cobertura no sean homogéneas. De todos modos, se ve que la curva sigue la tendencia de una función del tipo  $R^{-2}$  (la curva está graficada en escala logarítmica) como es esperable en una comunicación inalámbrica convencional. Se puede ver que para los rangos más distantes, se arma una nube de puntos en donde las energías medidas varían dentro de un margen aún mayor. Eso es debido a que corresponden a posiciones dentro del límite de *LoS*, entonces, es posible que mensajes que estén por fuera de esta frontera lleguen al receptor, pero muy degradadas. Finalmente, con esta curva que se recreó, se pueden validar los mensajes tomados en el aeropuerto de Bariloche. El usuario delimitará márgenes para cada rango, en los que él considere que la aeronave emite.

## 6.3. Resumen Capítulo 6

Este capítulo aborda varias de las mediciones hechas para probar el desempeño del receptor. Se hicieron pruebas de laboratorio, en las cuales se utilizó un RES, y pruebas de campo en el Aeropuerto de Bariloche.





**Figura 6.15:** Curva de validación de potencia según la distancia entre las aeronaves y el receptor para el aeropuerto de Bariloche.

En las pruebas con el RES, se midió la calidad de la señal frente al ruido y frecuencia de muestreo. También sirvió para validar la decodificación de la mayoría de los mensajes ADS-B. Pero lo más importante es que, estas pruebas sirvieron para probar el desempeño del receptor en escenarios complicados de encontrar realmente.

En las mediciones en el aeropuerto, se midió el área de cobertura del receptor, la cual se vio que está limitada por línea de vista. También, se hizo una validación de los mensajes de posición con otra fuente de datos ADS-B. Además, se recreó una curva de validación de potencia. Esta curva contiene las potencias medias recibidas para cada distancia de avión recibida. La misma sirve para hacer una validación de los mensajes recibidos y, de esa forma, poder mitigar mensajes de fuentes falsas.

En el capítulo siguiente, se tratarán los sistemas de ángulo de arribo de la señal. Las mediciones de ese sistema fueron hechas en el aeropuerto, pero serán tratadas en ese capítulo.

## Capítulo 7

# Medición del ángulo de arribo de señales ADS-B

*“Lo mágico es solamente lo común cuando ha sido rozado por la mano del genio.”*

— El Dr. Zhivago

El ángulo de arribo (*Angle of Arrival*, AoA) es una información muy valiosa que se puede obtener de un radar, ya que, éste no puede cambiar su posición drásticamente en un lapso corto de tiempo. Desafortunadamente, el AoA es también una información difícil de obtener, ya que requiere de muchas antenas con receptores. Las dos aproximaciones más comunes para medir el AoA están basadas en comparaciones de fase y de amplitud. Otra aproximación es usar el corrimiento Doppler de frecuencia generado por el movimiento de los aviones. Sin embargo, esta aproximación está relacionada con el sistema de medición de fase. Si el requerimiento es medir el AoA en señales simultáneas, el problema se vuelve aún más complicado, porque se necesitarán receptores con la capacidad de recibir múltiples señales.

En los sistemas de comparación de fase, esta magnitud debe estar adaptada desde las antenas hasta la salida de todos los receptores, lo cual es una tarea difícil a la hora de hacer el diseño. En general, los sistemas de comparación de fase pueden generar una resolución de AoA de  $\pm 1^\circ$  [27], lo cual satisface los requerimientos actuales.

Teóricamente, si las antenas-receptores de un sistema no están balanceados de forma correcta, se puede utilizar una tabla de calibración para minimizar las diferencias. Si un sistema está lejos de estar adaptado, se necesitarán calibraciones en muchos puntos, lo cual es muy difícil de implementar. En los diseños prácticos de sistemas de medición de AoA, el principal esfuerzo se centra en balancear las antenas con los receptores en los diferentes canales. La tabla de calibración es usada solo para compensar los desajustes de *hardware* restantes.

Si se utiliza una aproximación digital para la medición del AoA, los datos generados serán bidimensionales, en tiempo y espacio. Obviamente, el procesamiento será más complicado que los problemas únicamente basados en tiempo. Para tomar datos de AoA, se usarán múltiples ADC. Delante de los ADC, las antenas y receptores deben estar adaptados en fase, como en los sistema de medición de fase. La digitalización de los ADC debe operar de manera sincronizada. El número de antenas que pueden ser usadas en los sistemas de AoA es mucho menor en comparación con los necesarios para las antenas de escaneo electrónico usadas en los sistemas de radar. En un sistema de aeronavegación, diez antenas alcanzan para una buena resolución de la dirección [27].

En este capítulo, se discutirá cómo medir el AoA de aeronaves con capacidad de enviar señales de Modo S. Para ello, se usará un arreglo lineal compuesto por 2 antenas. Será una aproximación sencilla que servirá como introducción para lograr desarrollar un sistema más complejo en futuros trabajos.

## 7.1. Medición de AoA con arreglo lineal de dos elementos

Las mediciones de fase pueden ser usadas para medir la información de AoA. Se presenta un arreglo lineal de antenas con solo dos elementos, tal como muestra la figura 7.1. En esta figura, el ángulo  $\theta_1$  esta en la dirección positiva. Además, se asume que el sistema es de banda angosta. En otras palabras, solo hay una señal de entrada. Con dos elementos, las salidas son

$$\begin{aligned} e(0, t) &= A_1 \cdot e^{j2\pi f_1 t} \equiv A_1 \cdot e^{j\psi_0(t)} \\ e(1, t) &= A_1 \cdot e^{j(2\pi f_1 t + 2\pi f_1 \frac{d \sin \theta_1}{c})} \equiv A_1 \cdot e^{j\psi_1(t)}, \end{aligned} \quad (7.1)$$

donde  $A_1$  y  $\theta_1$  es la amplitud y el ángulo incidente de la señal de entrada y  $d$  es la distancia entre las dos antenas. Los ángulos de fase están representados por  $\psi_0(t)$  y  $\psi_1(t)$ . En esta ecuación, se considera el tiempo continuo.

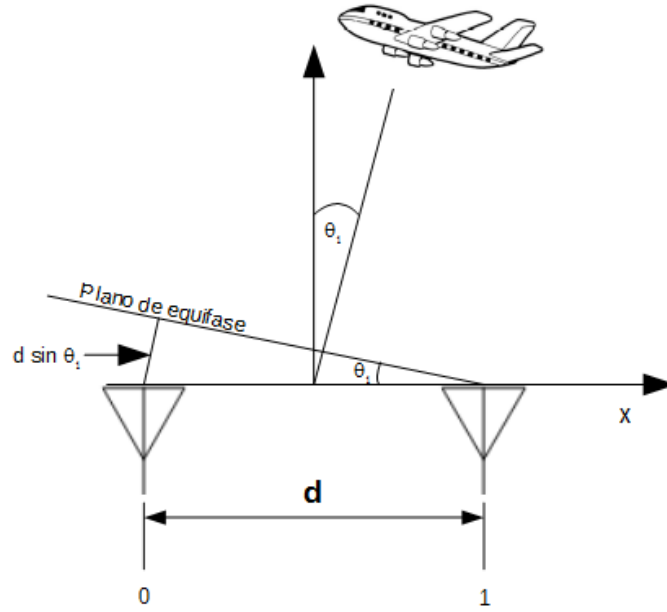
En un sistema de medición de fase analógica,  $\psi_0(t)$  y  $\psi_1(t)$  son las variables medidas. La diferencia entre las dos fases pueden ser usadas para medir la información de AoA como

$$\psi \equiv \Delta\psi_{10}(t) = \psi_1 - \psi_0 = \frac{2\pi f_1 d \sin \theta_1}{c} = \frac{2\pi d \sin \theta_1}{\lambda_1}. \quad (7.2)$$

Se pueden resaltar dos puntos interesantes de esta ecuación. Primero,  $\psi$  es independiente del tiempo  $t$ . Segundo, hay dos incógnitas,  $f_1$  y  $\theta_1$ .

Como  $\psi$  es independiente del tiempo, se necesitaría solo una medición en algún instante de tiempo para obtener el AoA. Sin embargo, debido a la contaminación de ruido, el resultado obtenido por una sola muestra puede ser impreciso. En general, se

necesitan muchas muestras para generar la información de AoA.



**Figura 7.1:** Sistema de AoA para un arreglo lineal de antenas de dos elementos

Ya que hay dos incógnitas, la frecuencia  $f_1$  tiene que ser medida primero. Esto es siempre cierto en los sistemas de comparación de fase. Esta frecuencia puede ser medida a partir de los datos de solo una antena del arreglo (por ejemplo la antena 0). Ya que éste es un sistema de banda angosta contiene solo una señal de entrada, la frecuencia se puede obtener como

$$f_1 = \frac{\psi_0(n) - \psi_0(0)}{2\pi n t_s} \equiv \frac{\Delta\psi_0(n)}{2\pi n t_s}, \quad (7.3)$$

donde  $t_s$  es el tiempo de muestreo. Para evitar ambigüedades de frecuencia, el ángulo de fase  $\Delta\psi_0(n)$  tiene que ser menor a  $2\pi$ . Un valor pequeño de  $n$  representa un retardo corto en tiempo y es usado para cubrir un espectro grande de posibles frecuencias. Un valor grande de  $n$  representa un retardo largo en tiempo y es usado para generar una resolución fina en frecuencia.

Una vez que se obtiene la frecuencia de la señal de entrada, la información de AoA puede ser obtenida usando 7.2 como

$$\sin \theta_1 = \frac{c\psi}{2\pi f_1 d} = \frac{\lambda_1 \psi}{2\pi d}. \quad (7.4)$$

El ángulo incidente está limitado entre  $-\pi/2$  y  $\pi/2$  y la correspondiente diferencia en  $\sin \theta_1$  es  $\sin(\frac{\pi}{2}) - \sin(-\frac{\pi}{2}) = 2$ . Ya que el valor máximo de  $\psi$  es  $2\pi$ , entonces, usando la ecuación de arriba, la máxima separación entre las dos antenas es

$$d_{max} = \frac{\lambda_1}{2}. \quad (7.5)$$

Esta es una relación muy conocida en arreglos lineales de antenas donde la separación máxima entre antenas tiene que ser menor o igual a  $\lambda/2$ .

A continuación, se resume la teoría discutida arriba.

1. En un sistema de AoA por medición de fase, la máxima separación entre antenas es  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal de entrada.
2. A partir de la salida en el dominio del tiempo de alguna de las antenas del arreglo, la frecuencia puede ser obtenida midiendo la diferencia de fases en función del tiempo. La frecuencia (o longitud de onda) de la señal de entrada es necesaria para calcular el AoA.
3. A partir de la diferencia de fases entre las dos antenas, el AoA puede ser medido usando 7.4. Teóricamente, solo un par de mediciones de fase determinarían el AoA; sin embargo, la precisión del AoA es más bien pobre.

Para mejorar la precisión, la medición de fase puede obtenerse como

$$\psi = \Delta\psi_{10} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [\psi_1(i) - \psi_0(i)]. \quad (7.6)$$

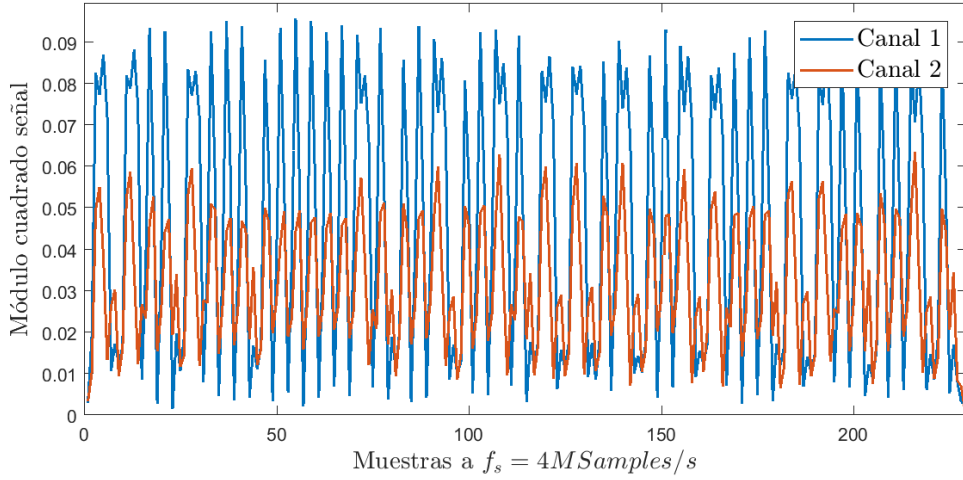
Esto es tomar el promedio de la diferencia de fases entre las dos antenas en muchos intervalos de tiempo [27]

## 7.2. Medición de AoA en aeropuerto

Se desea medir el AoA de una señal ADS-B. Para eso, se cuenta con un arreglo lineal de dos antenas GP-1090. Se usarán los dos puertos de recepción del SDR USRP B210. Es indispensable para la medición que los dos canales de recepción estén sincronizados en tiempo. En la figura 7.2, se puede ver la captura de una misma señal ADS-B por los puertos de la USRP B210. Como es esperable, las dos señales están sincronizadas en tiempo, ya que esta SDR utiliza el mismo reloj para los dos canales de recepción. La razón por la cual el nivel de señal es mayor en un canal que en otro es debido a las reflexiones que existen en las superficies, éstas provocan interferencias tanto constructivas como destructivas. También se debe a que cada canal utiliza una diferente cadena de recepción en donde ciertos parámetros pueden no ser iguales. Este fenómeno no es de interés ya que solo se evaluará la fase de la señal y no su amplitud.

Una vez comprobado el sincronismo, se procede a realizar el *setup* de medición. Para este caso, se desea medir el AoA de señales de ADS-B, de las cuales se conoce la frecuencia de emisión,  $1090\text{MHz}$ . Esto simplifica el problema, ya que solo hace falta medir la diferencia de fases entre los dos canales de recepción. Teniendo la frecuencia,



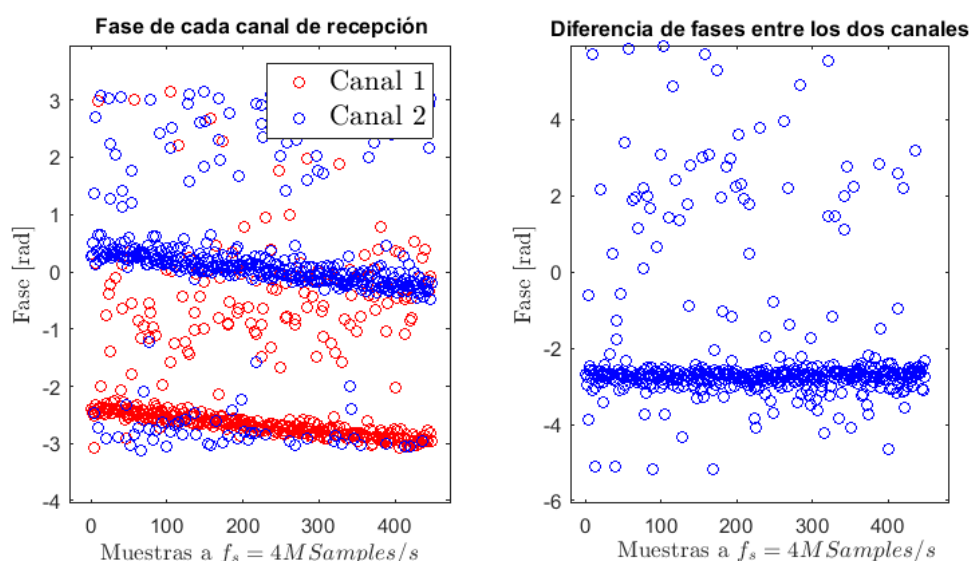


**Figura 7.2:** Validación de sincronización entre los dos canales de recepción de la USRP B210.

se sabe cuál es la longitud de onda  $\lambda_1 = 27,5cm$ . Entonces, utilizando 7.5, se obtiene la separación máxima entre antenas, y  $d_{max} = 13,75cm$  es la distancia que se usará para la medición.

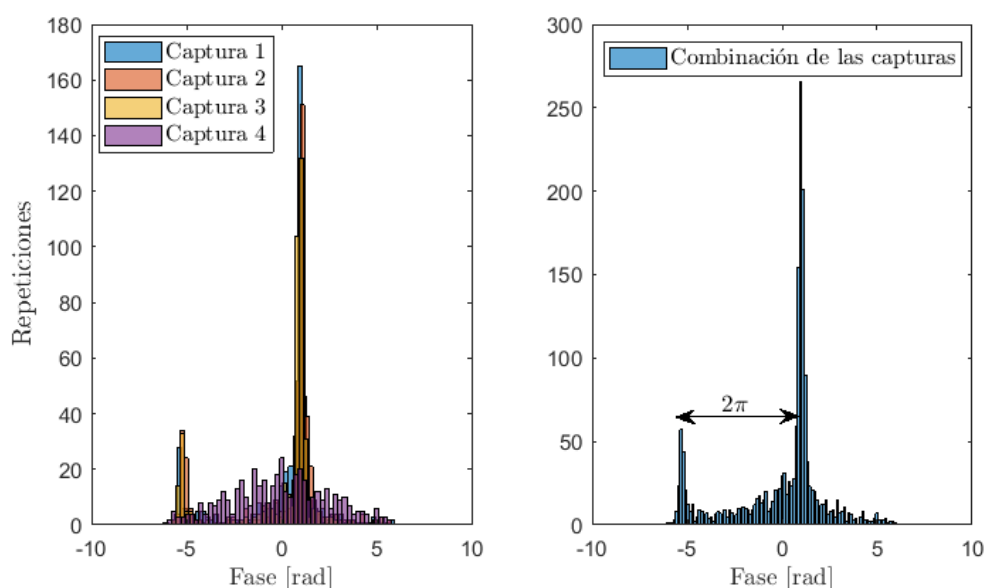
En la figura 7.3, se muestra por un lado las fases de cada canal de recepción por separado y del otro lado la diferencia entre esas fases. Se observa que la fase de cada canal presenta una leve pendiente. Esta pendiente corresponde al corrimiento en frecuencia de la señal en banda base. Si bien ese corrimiento debería ser cero, es muy complicado contar con un reloj sumamente preciso que pueda hacer esa transición para una gama amplia de frecuencias analógicas. Al calcular la diferencia entre las fases de los dos canales, se ve cómo la pendiente desaparece debido a que los dos canales contaban con la misma frecuencia. Esto hace que la diferencia entre las fases sea constante, tal como se esperaba, por lo cual esa diferencia de fases puede ser utilizada en 7.4 para calcular el AoA.

En esta medición, se está usando una  $f_s = 4MHz$ . A esa tasa, cada mensaje de ADS-B está comprendido por 448 muestras. Esas 448 muestras serían las utilizadas para hacer el promedio que se muestra en 7.6 para calcular  $\psi$ . Esta cantidad de muestras puede ser poca dependiendo del escenario de ruido en el cual esté sumergido el sistema de recepción. Para ello, tal como muestra la figura 7.4, se tomó más de un mensaje ADS-B. Se tiene que tener en cuenta que esos mensajes provengan de una misma dirección y de una misma aeronave. Para eso, solo se consideran mensajes de posición. Luego de procesar esos mensajes, se puede obtener el ángulo de azimuth del cual proviene la señal y el ICAO *aircraft address* de la aeronave emisora. Entonces, todos los mensajes con un mismo azimuth y código de identificación pueden ser considerados en el cálculo de diferencia de fases, haciendo más robusta la medición. Una peculiaridad de las fases de los mensajes ADS-B es que, cuando se realiza un histograma de las diferencias de fases, suelen aparecer dos modas. Esto podría complicar la medición, pero esas modas



**Figura 7.3:** Del lado izquierdo se observa la fase de la señal en cada uno de los canales de recepción. Del lado derecho, la diferencia de fases de la señal de cada uno de los canales.

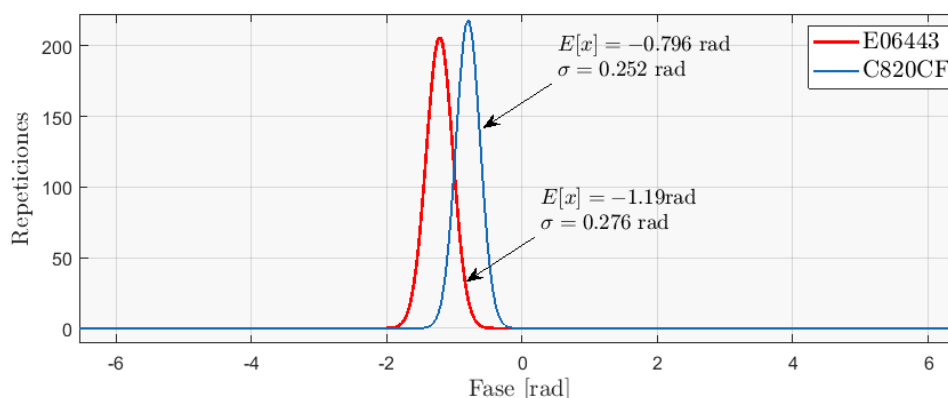
están totalmente correlacionadas y difieren exactamente en  $2\pi$ . La forma de solucionar este problema es llevando las fases fuera de  $-\pi$  y  $\pi$  a su equivalente en ese intervalo.



**Figura 7.4:** Del lado izquierdo, histograma de fases para cuatro mensajes ADS-B de un mismo ICAO *aircraft address* y azimuth. Del lado derecho, histograma de la concatenación de esos cuatro mensajes.

Ya con el método para calcular la diferencia de fases  $\psi$ , se procederá a mostrar un ejemplo de la medición del AoA en el aeropuerto. Para ello, se dispusieron las dos antenas en la facilidad que INVAP tiene en el aeropuerto. El apuntamiento de las antenas fue de  $57^\circ$  respecto del Norte. Es importante saber el apuntamiento, ya que después, se desea comparar el AoA con el azimuth medido gracias a los mensajes de posición. La separación de las antenas fue de  $\lambda_1/2 = 13,75\text{cm}$ , como ya se mencionó

antes. En mediciones de AoA con arreglo lineales de dos elementos, habrá ambigüedad con los ángulos medidos por delante o por detrás de las antenas. Para eliminar esa ambigüedad, se necesita una antena más dentro del arreglo. En este caso no es necesario, ya que se cuenta con información como para eliminar esa ambigüedad.



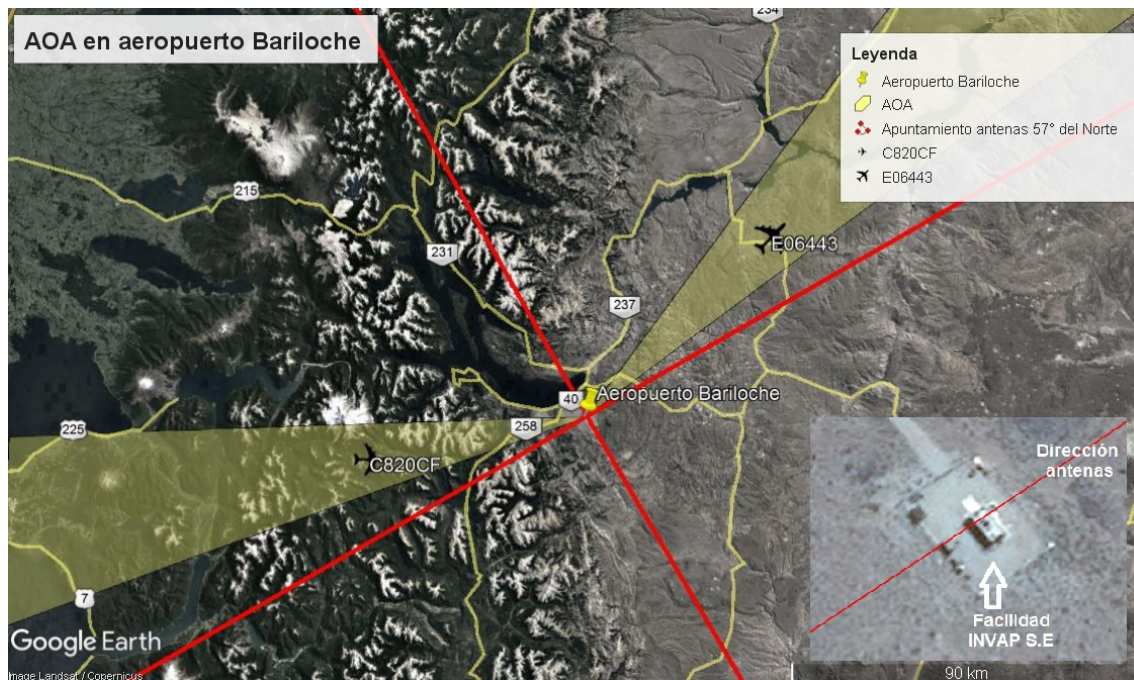
**Figura 7.5:** Ajuste gaussiano de los datos de diferencias de fases para las aeronaves E06443 y C820CF.

Aeronave	$\psi_{min}$ [rad]	$\psi_{max}$ [rad]	$\theta_{min}$	$\theta_{max}$	$\theta_{real}$
E06443	-1,466	-0,914	-27,8°	-16,9°	-18,1°
C820CF	-1,048	-0,544	-19,4°	-10°	-14,4°

**Tabla 7.1:** Mediciones AoA en el aeropuerto de Bariloche

Se toman cotas máximas y mínimas para los valores de diferencia de fases  $\psi$ . Esas cotas representan la separación en el valor de la desviación estándar respecto de la media, si se considera la distribución de  $\psi$  como gaussiana, como se muestra en la figura 7.5. Luego, utilizando 7.4, se calculan las cotas máximas y mínimas del AoA, tal como muestra la figura 7.6 en las áreas pintadas de amarillo. Los valores del AoA real se ven reflejados por el ángulo de las aeronaves que aparecen en el mapa respecto del apuntamiento del arreglo de antenas. Si bien no se sabe de antemano si la señal proviene de atrás o de adelante del arreglo de antenas, se cuenta con la información de los mensajes de posición de dichas aeronaves que ayudaron a eliminar esa ambigüedad. Como se ve en la tabla y en la figura, el  $\theta_{real}$  se encuentra dentro de los márgenes. Esta medición parece ser muy alentadora, pero no siempre es tan exitosa. En este caso, se mostraron dos ejemplos en donde las aeronaves volaban a una gran altura y en donde se podía asegurar que la señal llegaba sin rebotes al receptor, ya que las reflexiones implican variaciones en la fase. Existe la posibilidad de que, en zonas cordilleranas, como la de la ciudad de Bariloche, hayan reflexiones de la señal. Además, un arreglo de dos antenas no es un sistema de medición de AoA tan robusto, este sistema puede hacer que las cotas de medición sean demasiado grandes. Por eso, es recomendable agregar antenas al arreglo en lo posible, y utilizar algoritmos más sofisticados como

el ESPIRIT y el MUSIC [27]. En el caso de esta medición, solo se intentó dar los fundamentos teóricos y exponer algunas mediciones para introducir a los sistemas de medición de AoA en señales ADS-B.



**Figura 7.6:** Medición del AoA para dos aeronaves que sobrevuelan dentro del área de cobertura del aeropuerto de Bariloche.

### 7.3. Resumen capítulo 7

Se hizo una introducción a los sistemas de medición de AoA. Se hizo especial hincapié en los sistemas de medición de AoA a partir de la diferencia de fases entre dos antenas pertenecientes a un arreglo lineal. Se adaptó la teoría proveniente de [27] a señales del tipo ADS-B. Para la medición, se utilizaron dos antenas GP-1090 junto a sus LNAs y demás componentes y los dos puertos de recepción de la SDR USRP B210. Se midió la fase de cada uno de los canales y luego, se calculó la diferencia entre ellas. Para calcular el valor de  $\psi$  final, se hizo un histograma con varias mediciones provenientes de una misma aeronave con un mismo azimuth. A partir de ese histograma, se calcularon los márgenes de AoA usando 7.4, que luego se expusieron en el mapa para el caso de dos aeronaves, a las cuales se les conocía su posición en el instante en el que emitieron las señales.

## Capítulo 8

# Estudio de los sistemas de multilateración MLAT

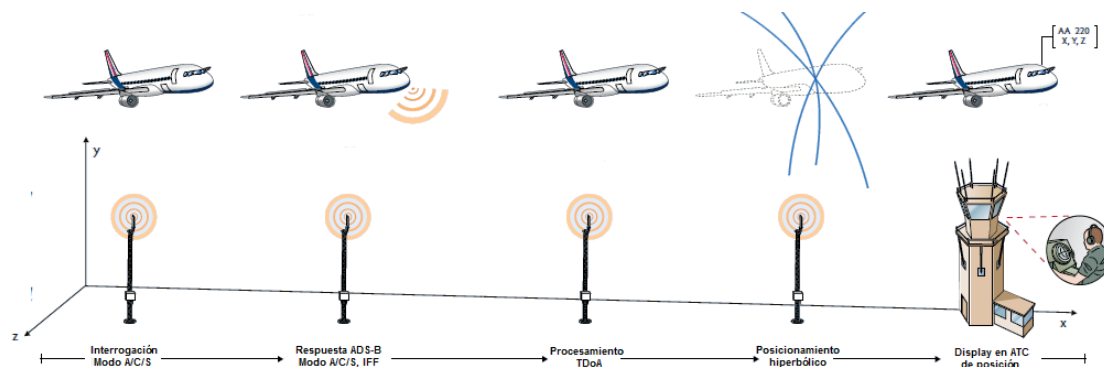
*“La matemática es la puerta y la llave de toda la ciencia.”*

— Roger Bacon

La multilateración (MLAT) es una tecnología que ha estado en uso desde hace varias décadas. Fue desarrollada con propósitos militares para localizar aeronaves de forma precisa (muchas de las cuales no desean ser localizadas), usando un método conocido como diferencia de tiempo de arribo (*Time Difference of Arrival*, TDoA).

La MLAT hace uso de diferentes estaciones terrenales las cuales están localizadas en lugares estratégicos alrededor del aeropuerto, para bien hacer seguimiento en el área local de la terminal o de áreas mayores para cubrir la mayoría del espacio aéreo. La MLAT no requiere de equipamiento adicional en las aeronaves, ya que usa como fuente de localización los mensajes de respuesta provenientes de los *transponders* convencionales (Modo A, Modo C y Modo S). Cada mensaje de respuesta llega a cada estación terrenal en instantes de tiempo diferentes. Esos tiempos son etiquetados como tiempo de arribo (*Time of Arrival*, ToA) y procesados en una unidad central, la cual utiliza algoritmos de localización a partir de los TDoAs. La actualización en la posición es mucho mayor a otros sistemas. Un sistema SSR convencional actualiza la posición en intervalos de 4 – 12s, mientras que los sistemas MLAT actualizan cada un segundo [28]

Entre las diferentes aplicaciones en las que se puede usar multilateración, se pueden mencionar el monitoreo en superficie de las aeronaves, el seguimiento de aeronaves dentro del área de la terminal, el seguimiento de gran alcance (*Wide Area Multilateration*, WMLAT), el monitoreo de altura de vuelo, las operaciones de aeropuerto, etc. Otras aplicaciones de gran interés para este trabajo son validar la posición informada en los mensajes de ADS-B y poder usar esto como una alternativa ante la pérdida de sistema GPS, para obtener la posición de los aviones. Como se ha mencionado en



**Figura 8.1:** Esquema gráfico del funcionamiento de los sistemas de MLAT.

capítulos anteriores, debido a la falta de autenticidad de los mensajes de ADS-B es posible que cualquier persona genere mensajes falsos. Un sistema completo de recepción ADS-B tiene que tener la capacidad de validar los mensajes, la MLAT es una forma de validación [29].

En este trabajo, se hará un análisis del algoritmo de Chan [30], para obtener la posición a partir de los TDoAs medidos en cuatro antenas ubicadas en diferentes locaciones. Luego, se hará un análisis de la precisión del algoritmo, de la separación entre antenas, de cuál es la topología adecuada para minimizar el error, el área de cobertura, etc. Todos estos análisis tendrán como objetivo dar los conocimientos que luego podrán ser aplicados al sistema de recepción ADS-B que se desarrolló.

## 8.1. Estimación de la posición utilizando el algoritmo de Chan

El algoritmo de Chan es una técnica efectiva para la localización de emisores basada en la intersección de curvas hiperbólicas definidas por los TDoAs de las señales recibidas en diferentes receptores. La aproximación no es iterativa y da una solución explícita. Es una realización aproximada del estimador de máxima verosimilitud y trata de llevar la cota mínima de Cramér-Rao a una región de error pequeño. Se explicará el algoritmo de Chan en grandes rasgos, para más detalle de este método ver [30].

Una vez que se tiene el ToA de una misma señal en los  $N$  receptores, se procede a armar una matriz de  $4 \times N$  con la posición de los receptores y los ToAs medidos, tal como muestra la siguiente ecuación

$$ToA = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 & ToA_0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & ToA_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & ToA_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & ToA_3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \quad (8.1)$$

donde  $X_i, Y_i, Z_i$  responden a la posición del receptor  $i$ ésimo. La matriz está ordenada por ToA, donde  $ToA_0$  es el tiempo de arribo más corto. Para obtener todos los TDoAs, se debe substraer el valor de  $ToA_0$  a los demás ToAs de la siguiente forma

$$\begin{bmatrix} 0 \\ TDoA_{1,0} \\ TDoA_{2,0} \\ TDoA_{3,0} \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ToA_0 - ToA_0 \\ ToA_1 - ToA_0 \\ ToA_2 - ToA_0 \\ ToA_3 - ToA_0 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}. \quad (8.2)$$

Adicionalmente, las diferencias de tiempo son convertidas en diferencias de distancia

$$R_{n,m} = TDoA_{n,m} \cdot c, \quad (8.3)$$

donde  $R_{n,m}$  es la diferencia de distancia entre el receptor  $n$  y el receptor  $m$ , y  $c$  es la velocidad de la luz.

Finalmente, las coordenadas de los receptores y las diferencias de distancia son empaquetadas en una matriz de  $4 \times N$ , la matriz DDoA:

$$DDoA = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 & 0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & R_{1,0} \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & R_{2,0} \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & R_{3,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}. \quad (8.4)$$

La matriz DDoA debe tener al menos 4 filas, correspondientes al número de receptores que se encuentren en la zona de monitoreo del emisor. Para este análisis, se trabajará con 4 antenas.

Una vez que se tiene la matriz DDoA, se procede a calcular la posición utilizando



la ecuación original de Chan,

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{1,0} & Y_{1,0} & Z_{1,0} \\ X_{2,0} & Y_{2,0} & Z_{2,0} \\ X_{3,0} & Y_{3,0} & Z_{3,0} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left( \begin{bmatrix} R_{1,0} \\ R_{2,0} \\ R_{3,0} \end{bmatrix} R_0 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{1,0}^2 - K_1 + K_0 \\ R_{2,0}^2 - K_2 + K_0 \\ R_{3,0}^2 - K_3 + K_0 \end{bmatrix} \right), \quad (8.5)$$

pero solo si se conoce antes  $R_0$ . Todas las otras variables son conocidas;  $X_{n,0}, Y_{n,0}, Z_{n,0}$  son las coordenadas del receptor  $n$  relativas al receptor 0,  $T_x, T_y, T_z$  son las estimaciones de la posición en los tres ejes y  $K_n$  es la distancia al cuadrado del receptor  $n$  al origen del sistema de antenas:

$$K_n = X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2. \quad (8.6)$$

A primera vista, parece que se tienen tres ecuaciones y cuatro incógnitas, pero éste no es el caso, porque las diferencias de distancia  $R_{n,0}$  no son independientes de la distancia de referencia  $R_0$ , de hecho  $R_n = R_0 + R_{n,0}$ . Además, dadas cuatro mediciones de diferencia de distancia (con  $R_{0,0} = 0$ ), se debería poder resolver las cuatro incógnitas [31].

En el apéndice A, se describe con mayor detalle el algoritmo de Chan y la manera de obtener  $R_0$ .

## 8.2. Precisión del algoritmo de Chan

La precisión de los algoritmos basados en TDoA depende sustancialmente de la exactitud en los registros de los ToAs. Se necesita una buena sincronización en tiempo entre las estaciones receptoras, ya que esa sincronización dará los márgenes en la medición. Habrá que resolver la relación de compromiso que se presenta entre la distancia entre estaciones y la exactitud de reloj deseada. Es decir, si se quiere ser preciso en la medición de posición con las antenas muy cerca (para cubrir más área), se debe tener una muy buena resolución en el tiempo. Mientras más alejadas se encuentren las antenas, más laxa será la precisión del reloj, pero menor será el área de cobertura.

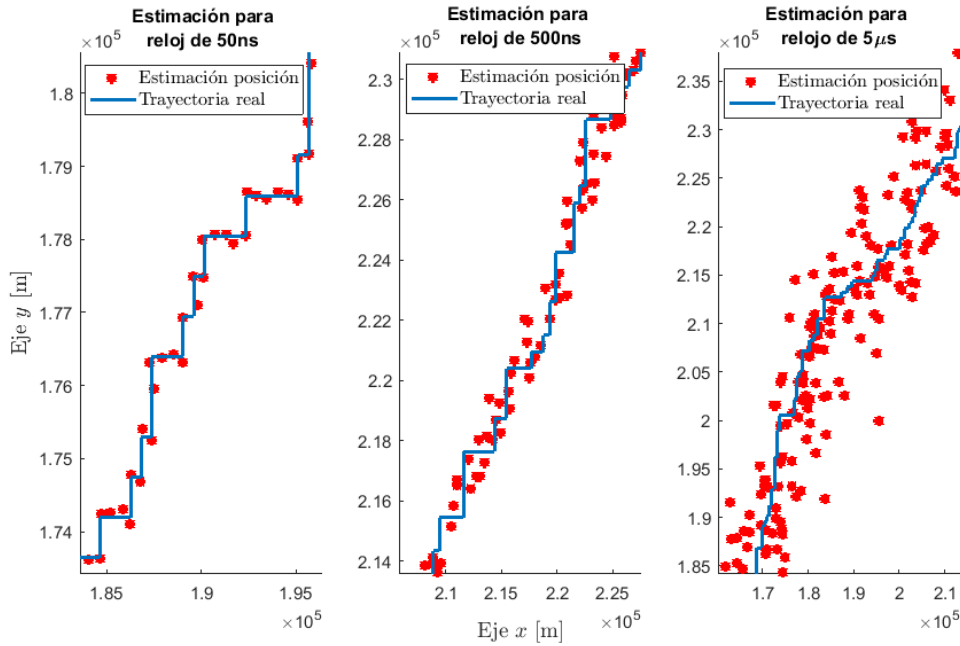
### Precisión del algoritmo y precisión del reloj

En la figura 8.2, se observan tres gráficos que muestran la precisión del algoritmo de Chan con precisiones de reloj de  $50ns$ ,  $500ns$  y  $5\mu s$ . La distancia entre antenas se mantiene fija, se usa una topología cuadrada donde las antenas están separadas  $100km$  del centro. En azul, se pueden ver la trayectoria real del emisor (generada de forma aleatoria), mientras que en rojo, se ve la estimación de la posición mediante la utilización del algoritmo. Cuando el reloj tiene una precisión de  $50ns$ , las estimaciones en la posiciones se asemejan bastante a la trayectoria real, pero cuando el reloj pierde



precisión, la estimación deja de ser tan precisa.

Hoy, existen en el mercado diferentes soluciones que pueden lograr exactitudes de reloj como las expuestas en la figura 8.2. Entre ellas, se encuentran los sistemas de reloj basados en GNSS. Estos sistemas utilizan la referencia universal de los relojes de la constelación de GNSS para lograr una buena exactitud en la medición del tiempo. Las soluciones comerciales de estos relojes pueden alcanzar precisiones de hasta  $10ns$ . Esto puede llegar a conspirar contra uno de los motivos por los cuales se desea usar MLAT, pero hoy existen diferentes alternativas en estos sistemas como son GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, etc. Por otro lado, existe otra solución basada en servidores de tiempo entre redes de computadoras. Estos sistemas son del tipo maestro-esclavo, donde el maestro es el que lleva la referencia de tiempo y se las informa a los esclavos para que la utilicen. El Protocolo de Red para el Tiempo (*Network Time Protocol*, NTP) ofrece este tipo de solución, puede alcanzar diferentes precisiones según la referencia que utilice el maestro, típicamente del orden de los microsegundos.



**Figura 8.2:** Precisión del algoritmo de Chan para diferentes exactitudes de reloj con antenas a una distancia fija.

Tal como muestra la ecuación 8.5, los sistemas de cuatro antenas son capaces de estimar la altura  $z$ . Pero para este análisis, solo se considerarán las estimaciones de la posición en los ejes  $x$  e  $y$ . Para calcular el error en la posición, se usará la siguiente ecuación

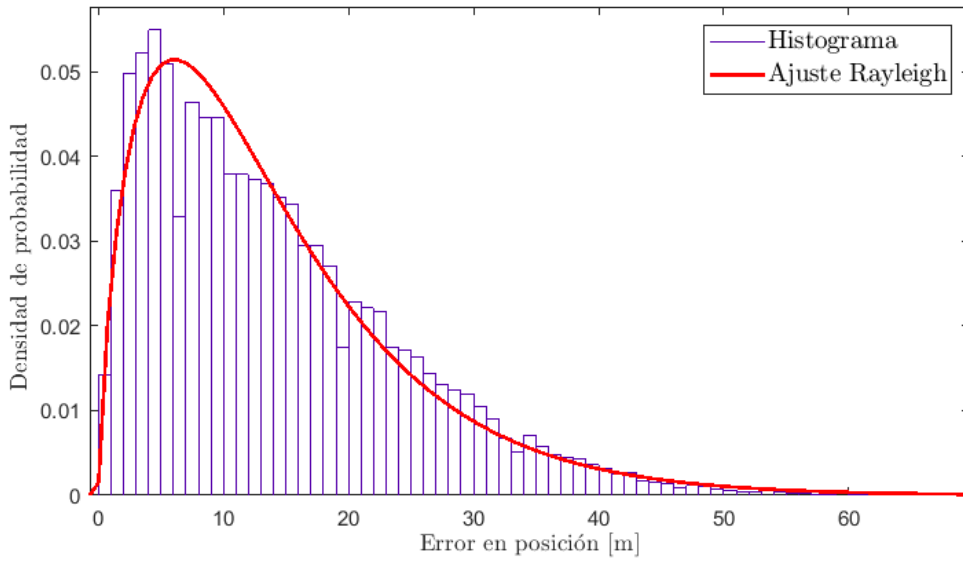
$$Error_{x,y} = \sqrt{(T_x^{real} - T_x^{est})^2 + (T_y^{real} - T_y^{est})^2}, \quad (8.7)$$

donde  $T_x^{real}$  y  $T_y^{real}$  son las posiciones reales del objetivo, mientras que  $T_x^{est}$  y  $T_y^{est}$  son las posiciones estimadas mediante el algoritmo de Chan. Se hicieron varias simulaciones para estimar la posición de una aeronave para una precisión de reloj de  $50ns$ . Con las

estimaciones y conociendo la posición real de la aeronave, se calculó el error usando 8.7. Luego, se hizo un histograma del error en la posición para esa aeronave y se vio que ajustaba de buena forma a una distribución del tipo Rayleigh [32], tal como muestra la figura 8.3. Esto tiene sentido, ya que, si se consideran a  $T_x^{est}$  y  $T_y^{est}$  como variables aleatorias gaussianas (no lo son exactamente), al aplicar la ecuación de arriba se debería obtener una distribución del tipo Rayleigh. Si se desea verificar que los datos responden a esta distribución, se puede realizar un ajuste de los mismos, estimando el único parámetro de la distribución,  $\sigma^2$ , por medio del método de máxima verosimilitud

$$\sigma^2 \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad (8.8)$$

donde  $x_i$  es la medida  $i$ ésima del error en la posición y  $N$  la cantidad de medidas hechas.



**Figura 8.3:** Distribución de los errores en la medición para los ejes  $x$  e  $y$

### Precisión del algoritmo y distancia entre receptores

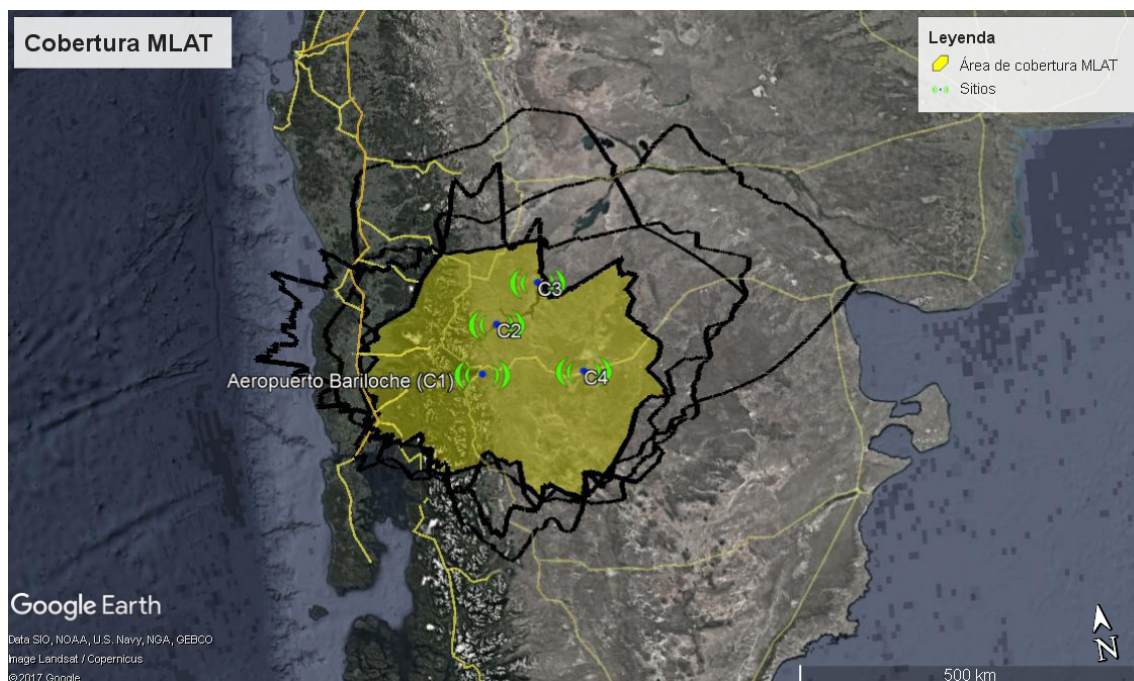
Se vio cómo la precisión de los relojes utilizados afecta a la exactitud en la estimación de la posición. En la tabla 8.1, se ve cómo se modifica la exactitud en la medición variando la distancia entre antenas para un tiempo fijo. Este inciso parece similar al anterior, ya que se puede interpretar la distancia como tiempo utilizando la velocidad de la luz. Entonces, al estar las antenas más separadas, los ToAs diferirán más en cada uno de los receptores y harán más laxa la medición. Pero la distancia entre antenas también implica área de cobertura. El área de cobertura para MLAT está constituida por la intersección de las áreas de coberturas de cada una de las antenas, tal como

muestra la figura 8.4, donde se desplegó un sistema MLAT para cubrir los aviones que llegan o pasan cerca de Bariloche. Por lo tanto, mientras más separados estén los receptores menor será el área de cobertura total.

Distancia entre antenas	Precisión en medición (reloj $10ns$ )
$100m$	$30km$
$1km$	$3000m$
$10km$	$300m$
$100km$	$30m$

**Tabla 8.1:** Precisión en la posición según la distancia entre antenas para una exactitud de reloj de  $10ns$ . La topología de las antenas es cuadrada y las distancias son tomadas desde el centro

Según cuál sea la aplicación en la que se use MLAT, será más conveniente tener mejor precisión de reloj y quizás menor área de cobertura, o al revés. En el caso que se quieran validar los mensajes de posición informados por ADS-B, no se necesita saber la posición exacta de la aeronave, ya que se está informando en el mismo mensaje. Entonces, solo se necesita saber si la aeronave se encuentra dentro de ese rango. Para eso, se necesita la mayor superficie posible y definir cotas de precisión para la validación. Probablemente, las cotas obtenidas para una separación de antenas de  $100m$  sean suficientes.

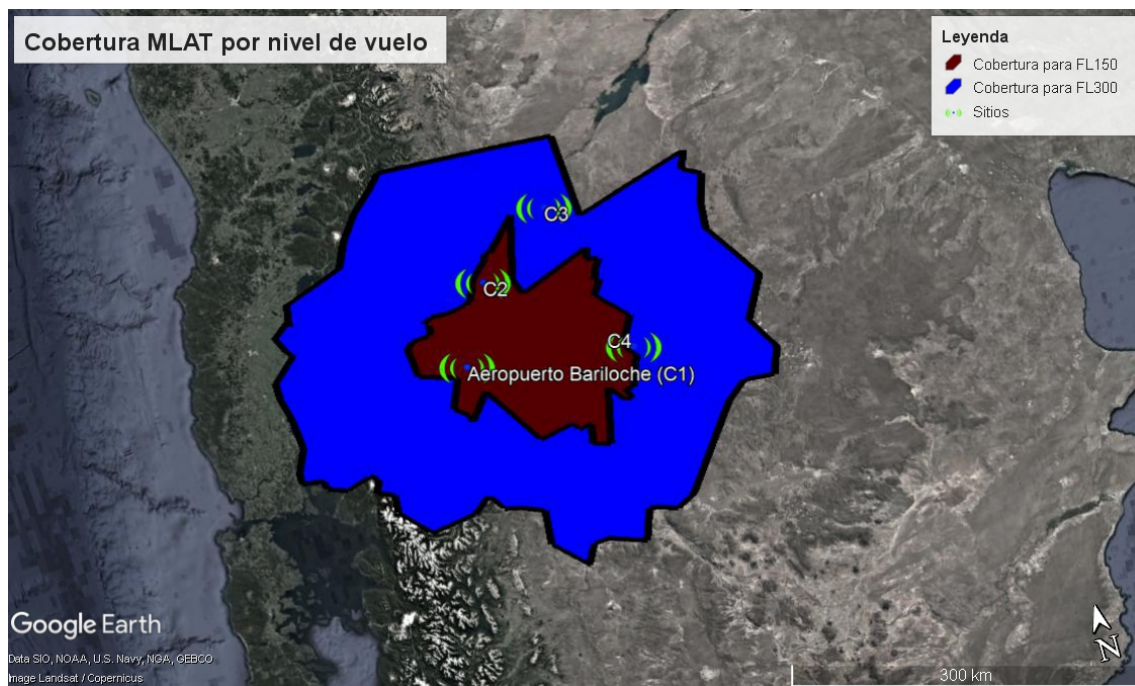


**Figura 8.4:** Área de cobertura de un sistema de MLAT para antenas separadas en promedio  $80km$ . El sistema está desplegado dentro del área del aeropuerto de Bariloche. Se utilizaron mapas de línea de vista para  $10000m$  (FL300) de altura de vuelo.

Por otro lado, el área de cobertura del sistema de MLAT dependerá de la altura de vuelo que se quiera observar. Como se ha visto, la *LoS* juega un papel muy importante,

al menos en ADS-B. Si se desean ver aeronaves en alturas de vuelo bajas, el área de cobertura por *LoS* tendrá menor superficie que el área de cobertura destinada a observar vuelos con alturas mayores. Por lo tanto, si el área de cobertura de un receptor disminuye, entonces, el área total de MLAT disminuye. Incluso puede suceder que no exista intersección entre estas superficies y en consecuencia no haya cobertura por MLAT. En la figura 8.5 se observan las áreas de cobertura por MLAT para alturas de vuelo de 10000m (FL300) y 5000m (FL150) y en la tabla 8.2 están los valores del área de cobertura en  $km^2$  tanto para cada sitio por separado como para la intersección.

En Europa, la empresa *FlightRadar24* tiene desplegada una red de receptores ADS-B con la capacidad de hacer MLAT. Este sistema solo puede estimar posiciones de vuelos por encima de los 4000m. El motivo es que por debajo de ese nivel de vuelo no hay intersección de al menos cuatro áreas de coberturas de receptores.



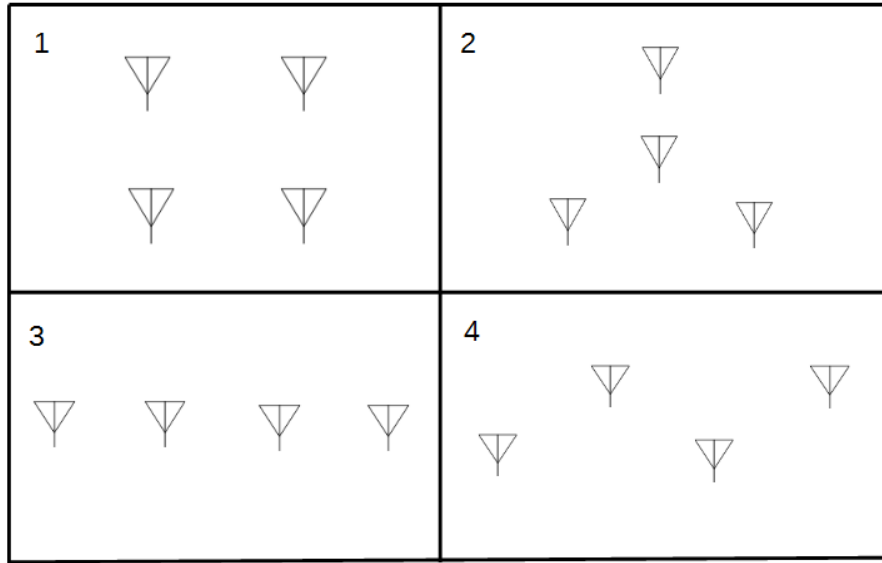
**Figura 8.5:** Cobertura de un sistema de MLAT para dos alturas de vuelo.

Sitio	Superficie para FL300	Superficie para FL150
$C1$	$145220km^2$	$37488km^2$
$C2$	$150260km^2$	$43231km^2$
$C3$	$204609km^2$	$73459km^2$
$C4$	$192402km^2$	$69237km^2$
$C1 \cap C2 \cap C3 \cap C4$	$96381km^2$	$18417km^2$

**Tabla 8.2:** Superficies de las áreas de coberturas de los receptores por separado y de la intersección de ellas para dos niveles de vuelo.

### 8.2.1. Análisis de topología para despliegue de receptores

Otro factor que resulta importante tener en cuenta a la hora de desplegar un sistema de MLAT es la topología con la que se desplegarán las antenas. De acuerdo a la forma en la que se coloquen las antenas en el espacio, se logrará más o menos precisión en la medición de la posición. Para este análisis, se evaluarán cuatro topologías diferentes, las cuales se muestran en la figura 8.6. Para sistemas de MLAT que utilicen más receptores, las topologías posibles serán más y el análisis se hará más complejo.



**Figura 8.6:** Cuatro opciones de diferentes topologías para desplegar un sistema de MLAT con cuatro antenas.

Para que la comparación entre sistemas sea justa, se calcularán las distancias respecto al centro de la topología para un mismo momento de inercia  $I$ . El momento de inercia se calcula como

$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2. \quad (8.9)$$

donde  $m_i$  es equivalente a la masa de cada punto del sistema. En este caso, se consideran masas de  $1kg$ , y  $r_i$  son las distancias de los puntos a un eje de referencia, en este caso el centro de cada topología.

En este análisis, se considera que todas las topologías tienen un momento de inercia  $I = 40000kg \cdot km^2$ . A partir de ese momento de inercia, se calculan los respectivos  $r_i$  para hacer el despliegue de las antenas. En la tabla 8.3, se compara a las topologías a partir del error en la estimación de la posición con precisiones de reloj de  $10ns$  y  $100ns$ . Para ello, se simuló una trayectoria aleatoria de un avión que volaba sobre un área de cobertura de  $300km$  de radio y, luego se estimó el error en la posición en cada topología. Se ve que la topología 2 es la que menor error devuelve, seguida de la topología 1. Mientras tanto, con la topología 3 se obtiene un error en la medición muy

alto, es más, si se utiliza una topología totalmente lineal, la ecuación de Chan queda irresoluble. Para poder informar un valor en esa topología, se varió mínimamente la posición en el eje  $y$ . Por lo tanto, se ve de la evaluación de estas cuatro topologías que la número 2 es la óptima (considerando este análisis) y la que se debe tratar de implementar a la hora de desplegar un sistema de MLAT con cuatro antenas.

Topología	Error en posición (reloj $10ns$ )	Error en posición (reloj $100ns$ )
1	$56m$	$420m$
2	$5m$	$49m$
3	$40000m$	$400000m$
4	$67m$	$614m$

**Tabla 8.3:** Evaluación de cuatro topologías posibles para despliegue de un sistema de MLAT, a partir del error en la posición estimado.

### 8.3. Resumen capítulo 8

En este capítulo, se hizo una introducción a los sistemas de MLAT, los cuales permiten obtener la posición de aeronaves equipadas con *transponders* de diferentes estándares de vigilancia aérea.

Se hizo un análisis de diversos factores que influyen a la hora de desplegar un sistema de MLAT, utilizando el algoritmo de Chan. El algoritmo de Chan estima la posición de forma no iterativa y de manera explícita. El mismo calcula el punto de intersección de las curvas hiperbólicas obtenidas a partir de los TDoAs entre los diferentes receptores. Entre los factores en la MLAT que se analizaron, se vio la precisión del algoritmo a partir de la exactitud del reloj en la toma de los ToAs de la señal. También, se analizó la relación que aparece entre área de cobertura y precisión en la medición, donde antenas más separadas darán mejor precisión en la estimación, pero menor área de cobertura por MLAT. Además, se vio que el área de cobertura también depende de la altura de vuelo que se quiera alcanzar observar. Finalmente, se hizo un análisis de cuál es la topología óptima para desplegar los receptores en MLAT, el análisis se hizo para cuatro antenas, pero éste es escalable.

Una vez hecho este análisis, se tienen varios conocimientos como para desplegar un sistema de MLAT en la aplicación que se desee. Por ejemplo, si se quiere usar un sistema de MLAT para desestimar mensajes ADS-B provenientes de fuentes falsas, no hace falta tanta precisión en la medición de la posición, por lo que se pueden acercar las antenas para cubrir un área mayor. Como también, en el caso de que la constelación de satélites GPS deje de funcionar, los sistemas de MLAT serán la fuente de información de posición de las aeronaves que sobrevuelen dentro del área de cobertura.



# Conclusión

Se logró cumplir con los objetivos principales planteados para este proyecto integrador. El objetivo principal fue desarrollar un prototipo funcional de un receptor de señales del tipo ADS-B. El desarrollo de este prototipo hizo posible que se obtuviera el conocimiento necesario para una ingeniería conceptual y básica. Esto se logró debido a que se entró en detalle en cada eslabón de la cadena y se analizaron los parámetros que se consideraron más importantes.

En lo que respecta a la elección de los dispositivos que comprenden la cadena de recepción, se vio que utilizar un LNA mejorará la relación señal a ruido, ya que amplificará la señal agregándole poco ruido a la misma, de esta forma el receptor será capaz de detectar señales en escenarios donde el nivel de potencia sea bajo y la relación con el ruido sea alta. También, la elección de antenas omnidireccionales es importante, debido a que una de las características de ADS-B es que los *transponders* emiten en todas las direcciones. Será importante que el coeficiente de reflexión de la antena este por debajo de un umbral para asegurar que no haya pérdidas considerables de la señal en la transición entre el medio alámbrico e inalámbrico. La ubicación de las antenas es importante ya que se precisa que haya línea de vista (*LoS*) entre ésta y las aeronaves, por lo tanto, se recomienda ubicar a la antena lo más alto posible, utilizando cables de transmisión con bajas pérdidas. Se vio ventajosa la utilización de plataformas como la SDR para el prototipado del receptor, ya que permitió seleccionar parámetros a medida y elegir cuáles eran los que mejor cumplían los requerimientos establecidos.

A la hora de procesar la señal, se identificaron diferentes factores que pueden llegar a influir en la probabilidad de detección. El factor más influyente, al menos en este trabajo, fue el tiempo de procesamiento. Como la implementación del procesador desarrollado en *software* no era capaz de procesar en tiempo real, la probabilidad de detección comenzaba con un piso de 40 % y la misma decrecía a medida que la cantidad de mensajes por *frame* aumentaba. De todos modos, los requerimientos de la ICAO piden una actualización cada 1s de las aeronaves detectadas, entonces, si la cantidad de aviones es baja el receptor sería capaz de hacer un seguimiento correcto de un escenario con esas características. Para poder procesar en tiempo real, se ha hecho una simulación del receptor en *Simulink* en la que se utilizan bloques de procesamiento que luego podrían ser utilizados en una FPGA, haciendo que los tiempos de procesamiento sean

mucho más bajos y aumentando la tasa de detección. Otros factores que intervienen en esta probabilidad de detección son la elección de la frecuencia de muestreo, el detector de preámbulo, el decisor de bits, la estimación del piso de ruido, etc. los cuales deben ser diseñados e implementados de forma tal que maximicen esta tasa.

A partir de un análisis teórico en el cual se consideraron las pérdidas en el espacio libre, potencia transmitida por los *transponders*, figura de ruido del sistema, condiciones del entorno, características de la señal, etc. se dedujo que el factor limitante en el área de cobertura del receptor sería la *LoS*. Esa hipótesis fue comprobada haciendo mediciones en el aeropuerto, donde las últimas detecciones de los aviones de una determinada altura se daban en el perímetro de los mapas de línea de vista de esa zona.

Se sabe que existe una velocidad relativa entre el receptor y los aviones, esto da lugar al efecto Doppler. No fue tenido en cuenta en este trabajo debido a que el desplazamiento en frecuencia de la señal debido al movimiento del avión es del orden de los kilohertz, mientras que el ancho de banda de la señal ADS-B es del orden de los megahertz, esta diferencia en el orden hace que este efecto pueda ser despreciado. En la figura 7.3, se observa una leve pendiente debida a la frecuencia del orden de los kilohertz en la medición fase de cada canal. Este suceso puede estar relacionado por el efecto Doppler. Una forma de corregir ese corrimiento sería utilizando un lazo realimentado capaz de hacer un seguimiento en frecuencia, de todos modos no fue necesario, ya que en esa sección se debía calcular la diferencia entre las fases de los dos canales la cual era constante.

Debido a la poca cantidad de muestras que otorga una señal ADS-B a la hora de medir el AoA con el metodo de diferencia de fases, la forma de incrementar el tamaño de datos útiles fue tomando las muestras de mensajes de un mismo avión que hayan llegado en un lapso de tiempo muy corto. De esa forma, se asegura que esos datos provengan de una misma dirección, por lo tanto la diferencia de fases de todas las muestras debería ser la misma. Se comprobó que esa hipótesis se cumplía, viendo que al formar un histograma de las distintas diferencias de fases de un avión éstas seguían una única moda, que en este caso coincidían con la media.

Se hizo un análisis de los sistemas de MLAT de los cuáles se sacaron algunas conclusiones interesantes a tener en cuenta a la hora de hacer un despliegue de este tipo. La precisión en la posición estará principalmente dominada por la diferencia de tiempos de arribo de la señal (TDoA) a los diferentes receptores, por lo tanto, factores como la sincronización, frecuencia de muestreo, ancho de banda de la señal y otros factores que influyan en la medida del TDoA tendrán un peso directo en la estimación de la ubicación del objetivo. También, es importante notar que habrá que resolver una relación de compromiso entre la separación de los receptores y la precisión de ubicación que se desee. Mientras más separadas estén las antenas menor será el área de cobertura por MLAT pero mejor será la estimación del TDoA, sucediendo lo contrario cuando las an-



tenas se encuentren cerca. La topología con la que se desplieguen los sensores también es un factor importante. En el caso de este trabajo se estudiaron cuatro topologías de cuatros antenas cada una. La que mejor resultado dio teniendo en cuenta el error en la precisión de la posición fue la topología 2 seguida de la 1. Mientras que la precisión en la topología 3, donde las antenas se desplegaban en solo una dimensión del espacio, era mucho peor a todas las otras. Esto se debe a que el algoritmo de Chan es irresoluble cuando se le saca un grado de libertad al sistema. Por lo tanto, se aconseja hacer uso de todas las dimensiones del espacio a la hora de desplegar un sistema de multilateración.

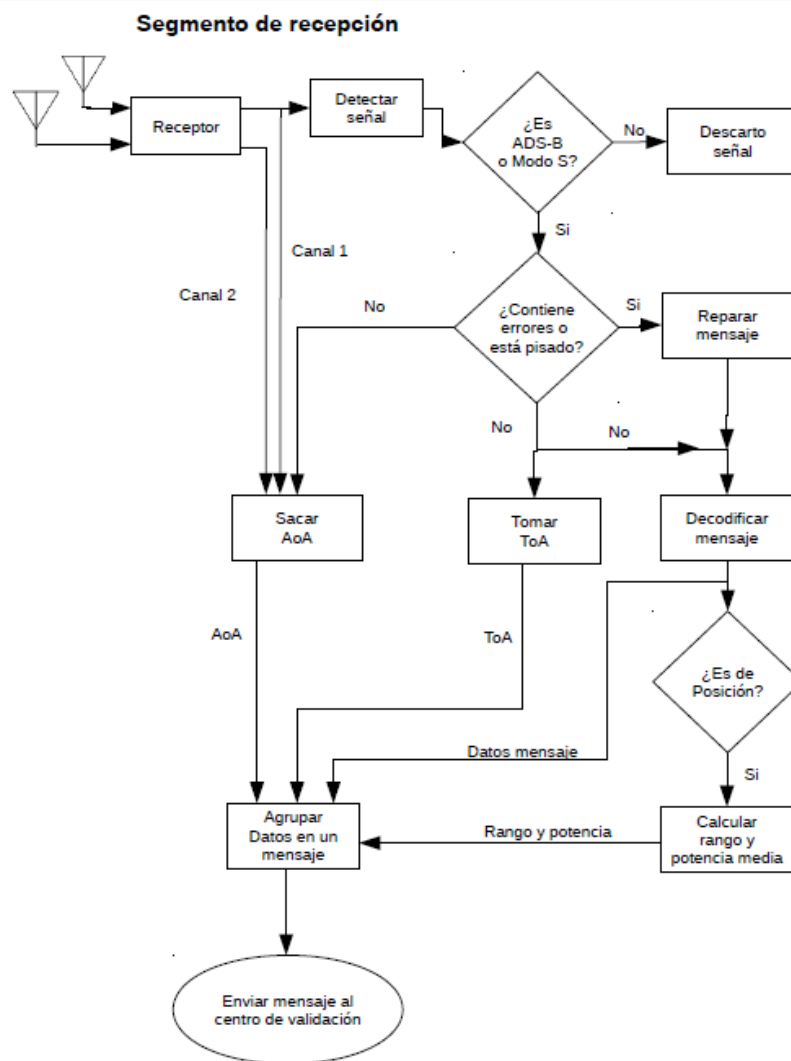
## Trabajos futuros

Una vez desarrollado el prototipo del receptor, es necesario optimizar cada eslabón del receptor para cumplir con los requerimientos de las entidades reguladoras, y así crear un producto competente en el mercado de sistemas de vigilancia aérea.

Será necesario hacer que el receptor sea capaz de procesar en tiempo real. Para eso, se podría hacer la implementación de la simulación en *Simulink* hecha para FPGA. También, el sistema debe ser capaz de poder distinguir mensajes que fueron pisados por la existencia de FRUIT. Se deberán desarrollar sistemas y algoritmos capaces de hacer *degarbling*. Desarrollar modelos matemáticos tanto para la detección de preámbulo como para el decisor de bits, que siendo implementados logren maximizar la probabilidad de detección de aeronaves. Hacer mejoras en el sistema de AoA, agregar antenas al arreglo lineal y diseñar algoritmos óptimos y usar los conocimientos generados en el capítulo 8 para implementar un sistema de MLAT.

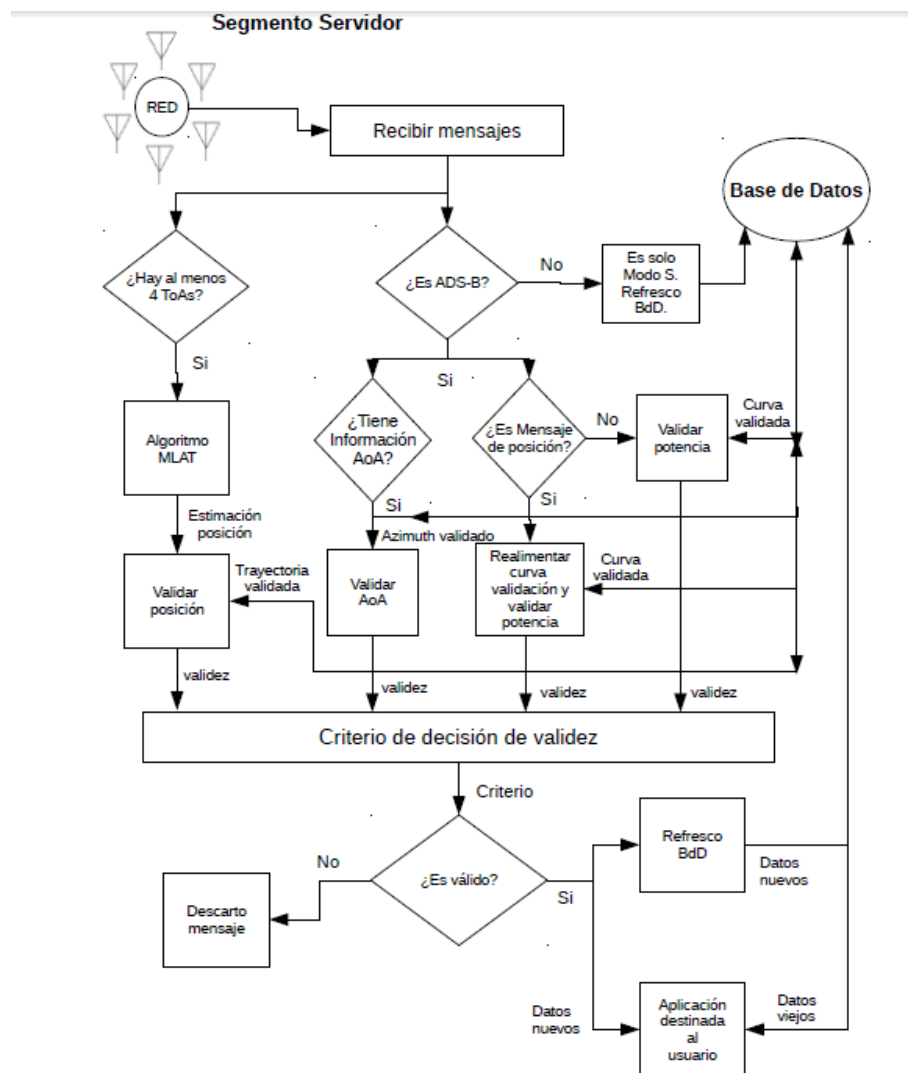
Una vez que se hayan implementado y mejorado los tópicos mencionados, el sistema de vigilancia que se quiere lograr es el que se muestra en los diagramas de bloques de las figuras 8.7 y 8.8. En el primer diagrama de bloques, se exponen los datos que cada segmento de recepción deberá mandar a un servidor centralizado encargado del manejo de información, como el que se desarrolló en este trabajo. Entre los datos que se envían, se pueden encontrar el AoA, el ToA, la posición del receptor, el mensaje ADS-B o respuesta de Modo S y la potencia de la señal. En la figura 8.7, se da el ejemplo para dos canales de recepción, esto podrá ser extendido a la cantidad de canales que se crean necesarios.

Por otro lado, en la figura 8.8, se observa el diagrama de bloques del segmento servidor. A este segmento le deberá llegar la información de  $n$  segmentos receptores. Si llega información de al menos cuatro segmentos receptores del mismo mensaje, entonces el sistema será capaz de hacer MLAT. Con la información obtenida por MLAT, por AoA, por potencia y por el mensaje en sí, el sistema evaluará de acuerdo a ciertos criterios implementados la veracidad del mensaje. Si el sistema decide que el mensaje es confiable, se procederá a utilizarlo en la aplicación correspondiente. En el caso que



**Figura 8.7:** Diagrama de bloques del segmento de recepción de mensajes del sistema completo de vigilancia

el sistema decida que el mensaje es falso, deberá descartarlo.



**Figura 8.8:** Diagrama de bloques del segmento servidor para el manejo de la información de los  $n$  segmentos receptores del sistema.

# Apéndice A

## Disección de la fórmula de Chan

Primero se necesita calcular las posiciones de los receptores 1, 2 y 3 relativas al receptor 0, porque la medición de diferencias de distancia son relativas al receptor 0. Se necesita hallar la matriz de diferencia de posición  $P$  como

$$P = \begin{bmatrix} X_{1,0} & Y_{1,0} & Z_{1,0} \\ X_{2,0} & Y_{2,0} & Z_{2,0} \\ X_{3,0} & Y_{3,0} & Z_{3,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ X_2 - X_0 & Y_2 - Y_0 & Z_2 - Z_0 \\ X_3 - X_0 & Y_3 - Y_0 & Z_3 - Z_0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.1})$$

Luego, se define la matriz  $A$  como la inversa negativa de  $P$

$$A = -P^{-1}. \quad (\text{A.2})$$

Cabe aclarar que si todos los receptores se encuentran dentro de un mismo plano, entonces, la matriz  $P$  será singular y no tendrá inversa. Por eso, es necesario desplegar los receptores utilizando todas las dimensiones del espacio.

Para el término final de la ecuación 8.5, se necesita el vector columna  $\bar{R}^2 = [R_{1,0}^2 \ R_{2,0}^2 \ R_{3,0}^2]^T$ . Finalmente, se necesita la distancia al cuadrado de los receptores al origen (el término  $K_n$ ). Para hallar este valor se puede multiplicar el vector posición de cada receptor por su transpuesto

$$K_n = X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2 = \bar{M}_n \cdot \bar{M}_n^T, \quad (\text{A.3})$$

donde  $\bar{M}_n = [X_n^2 \ Y_n^2 \ Z_n^2]$  es la posición del receptor  $n$ .

Ahora, se define el último término de la ecuación 8.5 como  $\bar{B}$

$$\bar{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{1,0}^2 - K_1 + K_0 \\ R_{2,0}^2 - K_2 + K_0 \\ R_{3,0}^2 - K_3 + K_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left( \bar{R}^2 - \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} + K_0 \right). \quad (\text{A.4})$$

Con estos elementos se puede escribir la ecuación 8.5 como

$$\bar{T} = A \cdot (\bar{R}.R_0 + \bar{B}) = (A \cdot \bar{R}).R_0 + A \cdot \bar{B}, \quad (\text{A.5})$$

definiendo dos nuevos vectores

$$\begin{aligned} \bar{E} &= A \cdot \bar{R} \\ \bar{F} &= A \cdot \bar{B} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

quedando

$$\bar{T} = \bar{E}.R_0 + \bar{F}. \quad (\text{A.7})$$

### Encontrar $R_0$

Si se sustituye la ecuación A.7 por  $\bar{T}$  en la siguiente ecuación

$$R_n = \sqrt{(X_n - T_x)^2 + (Y_n - T_y)^2 + (Z_n - T_z)^2}, \quad (\text{A.8})$$

y se elevan ambos lados al cuadrado, se obtiene

$$R_0^2 = (X_0 - (E_x.R_0 + F_x))^2 + (Y_0 - (E_y.R_0 + F_y))^2 + (Z_0 - (E_z.R_0 + F_z))^2. \quad (\text{A.9})$$

Se realiza la expansión de los términos al cuadrado;

$$\begin{aligned} R_0^2 = & (X_0^2 - 2X_0(E_x R_0 + F_x) + (E_x R_0 + F_x)^2) + \\ & (Y_0^2 - 2Y_0(E_y R_0 + F_y) + (E_y R_0 + F_y)^2) + \\ & (Z_0^2 - 2Z_0(E_z R_0 + F_z) + (E_z R_0 + F_z)^2) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} R_0^2 = & (X_0^2 - 2X_0 E_x R_0 - 2X_0 F_x + E_x^2 R_0^2 + 2E_x R_0 F_x + F_x^2) + \\ & (Y_0^2 - 2Y_0 E_y R_0 - 2Y_0 F_y + E_y^2 R_0^2 + 2E_y R_0 F_y + F_y^2) + \\ & (Z_0^2 - 2Z_0 E_z R_0 - 2Z_0 F_z + E_z^2 R_0^2 + 2E_z R_0 F_z + F_z^2) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

después, se debe reagrupar y reordenar de la siguiente forma

$$\begin{aligned} R_0^2 = & (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)R_0^2 + \\ & 2(X_0 E_x + Y_0 E_y + Z_0 E_z)R_0 - 2(E_x F_x + E_y F_y + E_z F_z)R_0 + \\ & 2(X_0 F_x + Y_0 F_y + Z_0 F_z) - (F_x^2 + F_y^2 + F_z^2) - (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2), \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

lo que resulta en una ecuación cuadrática de la forma  $aR_0^2 + bR_0 + c = 0$ , donde

$$\begin{aligned} a &= 1 - (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) \\ b &= 2(X_0E_x + Y_0E_y + Z_0E_z) - 2(E_xF_x + E_yF_y + E_zF_z) \\ c &= 2(X_0F_x + Y_0F_y + Z_0F_z) - (F_x^2 + F_y^2 + F_z^2) - (X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2). \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

Notar que el último término de  $c$  es igual a  $K_0$ .

En la forma vectorial y usando multiplicación, estos valores se convierten en

$$\begin{aligned} a &= 1 - \bar{E}^T \cdot \bar{E} \\ b &= 2\bar{M}_0 \cdot \bar{E} - 2\bar{E}^T \cdot \bar{F} \\ c &= 2\bar{M}_0 \cdot \bar{F} - \bar{F}^T \cdot \bar{F} - K_0 \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Finalmente, se puede encontrar  $R_0$  si se resuelve

$$R_0 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (\text{A.15})$$

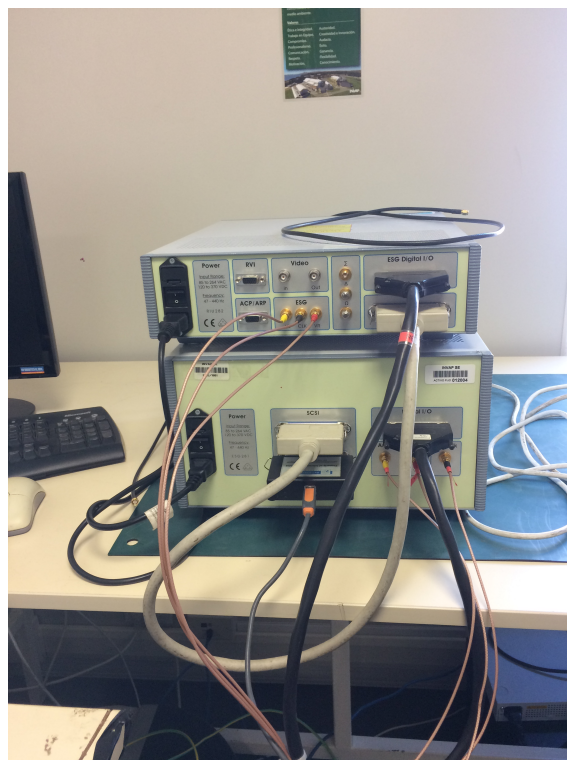
la cual tiene 2 posibles soluciones, al menos, si el discriminante es positivo. Ya que  $R_0$  es la distancia del objetivo al receptor 0, solo las soluciones de  $R_0$  tienen sentido. Si las dos soluciones existen y son positivas, entonces, ambas deben ser usadas en la ecuación de Chan [8.5](#).

## Apéndice B

### Fotografías



**Figura B.1:** Fotografía de la medición de parámetros del enlace de radio en la cámara anecoica de INVAP S.E



**Figura B.2:** Fotografía del simulador de entorno de radar, RES.



**Figura B.3:** Fotografía de medición de cobertura en la facilidad de INVAP S.E dentro del aeropuerto de Bariloche





**Figura B.4:** Fotografía de la facilidad de INVAP S.E por dentro.



**Figura B.5:** Fotografía de la medición de AoA en el aeropuerto de Bariloche.

# Anexo 1

## **Práctica Profesional Supervisada (PPS)**

Se informa que este Proyecto Integrador ha cumplido con más de 200 horas de Práctica Profesional Supervisada (PPS) en el grupo de modelística de la empresa INVAP S.E. bajo la supervisión del Dr. Jorge Osmar Lugo. Dicha PPS cubre las actividades de los capítulos 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

# Anexo 2

## Proyecto y Diseño (P&D)

Se informa que este Proyecto Integrador ha cumplido con más de 200 horas de actividades de Proyecto y Diseño (P&D), en las cuales se emplearon conocimientos de ciencias básicas y de la ingeniería para el desarrollo del trabajo. Las actividades que contemplan el P&D son las que se describen en los capítulos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Dr. Jorge Osmar Lugo

# Bibliografía

- [1] Richards, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill Professional Engineering, 2014. 3
- [2] Skolnik, M. I. Introduction of Modern Radar, 2nd Edition. McGraw-Hill, 1980. 3
- [3] Stevens, M. C. Secondary Surveillance Radar, 8th Edition. Artech House Radar Library, 1988. 3, 5, 31, 58
- [4] Ads-b next generation. URL [www.ads-b.com](http://www.ads-b.com). 6, 7
- [5] ICAO. Aeronautical Telecommunications, Annex 10. Volume IV. 6, 7, 39, 58, 76
- [6] Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter. 10, 23, 39
- [7] Referencia antenna gp-1090. URL [www.wimo.com/gp1090-1090mhz-antenna\\_e.html](http://www.wimo.com/gp1090-1090mhz-antenna_e.html). 13
- [8] Robert W. Stewart, D. S. W. A., Kenneth W. Barlee. Software Defined Radio using MATLAB & SIMULINK and the RTL-SDR. University of Strathclyde Engineering, 2015. 17
- [9] Sdr usrp b210 datasheet. URL [https://www.ettus.com/content/files/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf). 19, 20
- [10] Nyquist, H. Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, **47** (2), 617–644, April 1928. 26
- [11] Johnson, D. H. Statistical Signal Processing. RICE University, 2013. 30
- [12] Harman, W., Gertz, J., Kaminsky, A. Techniques for improved reception of 1090 mhz ads-b signals. En: 17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36267), tomo 2, págs. G25/1–G25/9 vol.2. 1998. 31, 32
- [13] Haykin, S. Digital Communication Systems. Wiley, 2013. 32
- [14] Lin, Costello. Error Control Coding. Pearson Prentice Hall, 2004. 32

- [15] Floyd, T. L. Fundamentos de Sistemas Digitales. Pearson Prentice Hall, 1997. 33
- [16] Donovan. Four Quick Steps to Production: Using Model-Based Design for Software defined Radio (Part 1,2,3,4). *Analog Devices*, 2015. 33, 34
- [17] Pagina web de flightaware. URL [www.flightaware.com](http://www.flightaware.com). 58
- [18] Pagina web de flightradar24. URL [www.flightradar24.com](http://www.flightradar24.com). 58
- [19] Pagina web de plinefinder. URL [www.plinefinder.com](http://www.plinefinder.com). 58
- [20] EUROCONTROL STANDARD DOCUMENT FOR SURVEILLANCE DATA EXCHANGE Part 12 : Category 021, ADS-B Reports. 62, 63
- [21] EUROCONTROL STANDARD DOCUMENT FOR SURVEILLANCE DATA EXCHANGE Part 4 : Category 048, Transmission of Monoradar Target Reports. 63
- [22] Pagina web de wireshark. URL [www.wireshark.com](http://www.wireshark.com). 63
- [23] Radar Analysis Support System for Site Measurement User Manual, Intersoft Electronics. 67
- [24] Ziemer, R. Principles of CCommunication Systems, Modulation, and Noise , 7th Edition. Wiley, 2009. 75
- [25] Tomasi, W. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Pearson Education, 1996. 75, 76
- [26] Recomendación UIT-R P.530-13(10/2009). Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales. 78
- [27] Tsui, J., Cheng, C.-H. Digital Techniques for Wideband Receiver, 3rd edition. Scitech Publishing, 2016. 83, 84, 86, 90
- [28] Multilateration Executive Reference Guide. 91
- [29] Monteiro, M., Barreto, A., Division, R., Kacem, T., Carvalho, J., Wijesekera, D., *et al.* Detecting malicious ads-b broadcasts using wide area multilateration. En: 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC), págs. 4A3–1–4A3–12. 2015. 92
- [30] Chan, Y. T., Ho, K. C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **42** (8), 1905–1915, Aug 1994. 92
- [31] A python Implementation of Chan’s TDoA algorithm for Ultrasonic Positioning and tracking. 94

- 
- [32] Garcia, L. Probability, statistics, and Random Processing for Electrical Engineering. Pearson Prentice Hall, 2006. [96](#)

# Agradecimientos

Quiero aprovechar esta sección para agradecer a todos los que hicieron posible que este trabajo pueda ser realizado con éxito. A la empresa INVAP, por abrirme las puertas y brindarme todas las herramientas necesarias en tiempo y forma para todas las actividades que se hicieron. A Jorge Lugo, mi director y mano derecha en este trabajo, quien me brindó todo su tiempo, conocimiento y ganas. Al grupo de modelística y a los chicos del laboratorio del EICO, quienes siempre que lo necesite me dieron una mano. A Roberto Costantini y Nicolás Ivone, profesores que me ayudaron en parte del desarrollo de algunas secciones. Y a todos aquellos que no he mencionado pero aportaron con su granito de arena a la realización del proyecto.

También, es igual de importante agradecer a los afectos, pilares fundamentales en este camino. A mi vieja, que es una luchadora de la vida, gran ejemplo a seguir y quien siempre me apoyo en mis decisiones. A Camila, mi novia, mi cable a tierra y quien me apoya constantemente desde el día 0 en todo y, además, ha colaborado gratamente en las correcciones del trabajo. A mis hermanos, por compartir la vida con ellos y además agradezco tenerlos. A Any y Pedro, mis padrinos, personas a las que quiero mucho y siempre me apoyaron. A mis amigos, por ser incondicionales y siempre estar a pesar de la distancia. A Nacho y Lucas, los otros dos “Telecos”, compañeros y amigos con quienes atravesamos este largo camino. Y a toda mi familia, tanto la de sangre como la matrera, donde se que siempre tendré un soporte.

Este trabajo hace que concluya una etapa, y que surja una nueva. Por eso, creo que agradecer es síntoma de felicidad por lo logrado, de que se hicieron las cosas bien (con piedras en el camino) y principalmente del tipo de persona que es cada uno.

Muchas Gracias.